



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Universidad de Pinar del Río
"Hermanos Saiz Montes de Oca"
República de Cuba

Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias

Universidad de Alicante España.

Universidad de Pinar del Río. Cuba.

Doctorado cooperado:

“Desarrollo Sostenible de Bosques Tropicales: Manejos Forestal y Turístico”

Título: Caracterización hidrológica en los ecosistemas de pinares naturales con y sin manejo en la Estación Hidrológica Forestal “Amistad”, Alturas de Pizarra, Cuba

Autor: Ariel Tomás Plasencia Puente.

Directores de tesis: Dr. C. Juan A. Herrero Echevarria DNF
Dr. C. Ángel Zaldívar Solís. UPR
Dra. C. Arelys Quintero Silverio UPR
Dr. C. Antonio Escarré Esteve U.A

OCTUBRE 2010

Agradecimientos

Llegar al final del extenso procesamiento y análisis de las bases de datos para obtener la información, que acompañado con la fase académica y la búsqueda bibliografía, ha permitido confeccionar la tesis doctoral relacionada con las investigaciones acerca de la hidrología forestal en el marco del 30 aniversario de la Estación Amistad, la cual puede servir de guía y ayuda a otros interesados en el tema, en beneficio al ecosistema y de la especie humana. A este esfuerzo se le une la ayuda integrada de un gran número de personas que han contribuido a que esta idea se convierta en realidad.

Por lo cual le estaré eternamente agradecido:

- A la revolución cubana por haberme permitido realizar el Doctorado en Ciencias
- Al Dr. Antonio Escarré por su permanente seguimiento, dedicación y búsqueda de alternativas en la conducción de la Tesis Doctoral. (Incluyendo a su esposa por su colaboración)
- A la Dra. Yilian Morejón por su gran participación, colaboración y ayuda en el procesamiento de los datos..
- Al Dr. Ángel Zaldivar Solís por su sistematicidad y apoyo incondicional en la conducción de la tesis (Incluyendo a su familia).
- Al Dr. Juan A. Herrero por su permanente orientación y preocupación por la marcha de la tesis.
- Al Ing. Arsenio Renda por su continua colaboración en la conducción del proyecto y la tesis.
- Al Ing. Montalvo por su colaboración en procesamientos estadísticos.
- Al Ing. Efraín Calzadilla por su colaboración.
- A la Dra. Arelys Quintero Silverio por la gran participación en los procesamientos estadístico y su conducción en la tesis.
- Al Dr. León Coro por su cooperación desde el comienzo en la revisión de la tesis.
- A la Dra. Maria Amparo por su colaboración en los procesamientos estadísticos.
- Al Dr. Rubén Chamizo por la preocupación de la marcha del doctorado.
- Al Dr. Rogelio Sotolongo por su participación en los analices de correlaciones.

- Al Dr. Alberto Vidal por sus exigencias en la superación de los –investigadores
- A Jaula por indicar el camino correcto.
- A la Dra. Grisel Herrero por su revisión detallada.
- A la Universidad de Pinar del Río (Cuba) y la Universidad de Alicante (España) y a sus profesores,
- Al Instituto de Investigaciones Forestales por su apoyo y colaboración en el desarrollo del doctorado.
- A la Estación Experimental Forestal de Viñales por apoyó incondicional tanto de la dirección, como los investigadores y trabajadores en general. En especial la colaboración de Lorenza Martínez, Danelis Bejerano y Jorge Luís
- A mis compañeros de trabajo por haberme facilitado a través de ellos la base de datos y toda información que pudiera hacer falta de la Estación “Amistad”: Rafael Cruz, Dionisio Cruz, Manuel Arteaga, Gilberto González, Julio Arteaga, Roberto Cruz y Gema Martínez.
- A otros colaboradores que trabajaron en la Estación “Amistad” como los Ing. Rolando Toledo, Julia Fernández Madera y Nancy Mora. Los técnicos Ignacio Amador y Víctor Martínez Biamonte.
- Al Joven Club de San Diego de los Baños y sus informáticos por su colaboración.
- A los compañeros del policlínico San Diego por el apoyo con sus medios informáticos.
- A mis padres, Esposa e hija citada en la dedicatoria y mi hermano Andrés Plasencia, suegro Eduardo Valdés y cuñado Jesús Valdés, y demás familiares y amistades por el apoyo en el proceso de realización de la tesis doctoral y mis ausencias.

DEDICATORIA.

- A mis padres Carmen Puente González y Andrés Plasencia Lorenzo.
- A mi hija Maria del Carmen Plasencia Valdés.
- A mí esposa Mirian Valdés Garcia.
- A la paz, al amor y la prosperidad entre los pueblos.

“La generosidad congrega a los hombres, y la aspereza los aparta”.
“No hay que acobardarse ante los peligros, sino conocerlos, y afrontarlos.”

José Martí

CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN.

Las funciones útiles del bosque para la vida del hombre en la tierra son altamente conocidas desde hace mucho tiempo, pero ellas se evalúan de manera seria en los últimos años por su vinculación en proteger al medio ambiente (aire, agua, suelo), la biodiversidad, así como por la necesidad de buscar alternativas para el desarrollo acelerado de la economía en todo el mundo, por consiguiente este tema ocupa un lugar priorizado en todos los escenarios internacionales como en las Organizaciones de Naciones Unidas (ONU), ONG y otras.

Todos los países del mundo y principalmente aquellos que sienten más intensamente la insuficiencia de agua para el consumo humano y para la industria, buscan afanosamente los caminos más adecuados para proteger y aprovechar más racionalmente sus recursos hídricos. Esta situación conlleva a un minucioso estudio para aprovechar correctamente aquellos elementos que optimizan la conservación y aumento del aforo actual del agua natural, así como su calidad.

Según la Estrategia Ambiental Nacional (CITMA, 2005), los principales problemas ambientales en el país son: la degradación de los suelos, las afectaciones a la cobertura forestal, la contaminación, la pérdida de la diversidad biológica y la carencia de agua.

Todos estos problemas se reflejan en mayor o menor grado en la actividad agropecuaria y amenazan la seguridad alimentaría y la estabilidad de la creciente población cubana, lo que unido al carácter insular del país y a los impactos ya presentes del cambio climático, ponen de relieve la obligada importancia y necesidad de perfeccionar el manejo de la cubierta forestal en general y de los pinares en particular, para contribuir a solucionar estos y otros problemas ambientales (MINAG, 2006).

Lo anterior cobra más importancia aún si se tiene en cuenta que aproximadamente el 40 % del territorio nacional está ubicado en regiones de ecosistemas frágiles como las montañas, zonas costeras, humedales y cayerías, donde existe el 33 % de los asentamientos poblacionales y el 29 % de la población del país.

Los bosques de pinares tienen una enorme importancia en la economía forestal, debido a su uso universal y a su relativamente rápido crecimiento, hasta el punto que las proyecciones del fomento forestal en el mediano plazo contemplan un área necesaria para la economía del país, superior a las 180000 ha., entre bosques naturales y plantaciones (Dirección Nacional Forestal 2008)

Un inadecuado aprovechamiento de esas plantaciones puede generar impactos ambientales negativos que modifiquen cualitativamente las aguas superficiales, aumentan las tasas erosivas de los suelos y disminuyen su fertilidad, alteren el ciclo hidrológico de las cuencas hidrográficas y amenacen la vida útil de las costosas obras hidráulicas construidas aguas abajo para satisfacer necesidades de la población, la agricultura y la industria. La influencia de las talas y los tratamientos silvícolas en la calidad de las aguas, la erosión y en el rendimiento hídrico, de las cuencas hidrográficas ha sido estudiada en diversas partes del mundo en general y en Cuba en particular,

Los recursos hidráulicos potenciales superficiales y subterráneos del país se han evaluado en 38130 millones de metros cúbicos por año, originados a partir de las precipitaciones. De ellos se estimó que el 83 % se corresponde con el escurrimiento superficial en 632 cuencas hidrográficas y el 17 % a las aguas subterráneas (INRH, 2002). Los mismos son insuficientes a los efectos de asegurar el desarrollo actual y prospectivo del país, aspecto que se agrava si se tiene en cuenta la existencia de niveles de contaminación y la distribución no uniforme del recurso, a lo que se une la variación estacional acentuada del drenaje superficial. Por tales razones en esta investigación se pretende dar respuesta al siguiente problema:

En los ecosistemas de pinar de Cuba, no se conocen bien los efectos que los sistemas de explotación tienen en los balances hídricos, la producción de sedimentos y las características químicas del agua de escurrimiento, y menos en un medio en el que pueden existir tasas importantes de deposición ácida y en cuyas características climáticas sería esperable apreciar la existencia de tendencias atribuibles al cambio climático.

Objeto: Ecosistema pinar de la alturas de pizarra.

Hipótesis principal: Los sistemas de explotación silvícola influyen en el balance hídrico, erosión y química del agua pero producen una afectación moderada, en unos pinares sometidos a un proceso de acidificación y que se encuentran en un entorno climático muchas de cuyas variables muestran tendencias temporales significativas de variación.

Objetivo general:

Caracterizar el balance hídrico, la erosión y la química del agua teniendo en cuenta el clima y las intervenciones silvícolas en el ecosistema pinar de las alturas de pizarra, y determinar la existencia de tendencias en variables climáticas e hidroquímicas.

Objetivos específicos:

- 1- Caracterizar las variables climáticas en la Estación Hidrológica Forestal Amistad en el periodo comprendido entre 1979 y el 2005, y analizar la posible existencia de tendencias.
- 2- Determinar los flujos hidrológicos en el ecosistema pinar natural (traslocación, escurrimiento cortical e interceptación).
- 3- Analizar la partición de las lluvias en escurrimiento y evapotranspiración.
- 4- Caracterizar la química del agua de escurrimiento y la presencia o no de lluvias ácidas.
- 5- Determinar el escurrimiento sólido en la Estación Amistad.
- 6- Analizar el efecto de los manejos forestales en el escurrimiento y en la calidad del agua.

1.1 Antecedentes del uso de microcuencas en investigaciones de Hidrología Forestal.

Las investigaciones en pequeñas subcuencas sobre la influencia de la vegetación boscosa en el escurrimiento superficial y subterráneo, comenzaron en 1900 en Suecia, para lo que se seleccionaron dos subcuencas, Sperbal y Rappen, en Bernckon

Kantong, a una altitud de 1000 m y con el 97 % y 35 % del área cubierta por bosque respectivamente. Este primer estudio dio como resultado que en la segunda subcuenca (35 % de vegetación forestal) hubo un aumento significativo en el escurrimiento superficial (Ranmanov, 1981, citado por Molina, 1981).

En 1908 en la Estación Experimental Mapuro de Japón, se comenzaron estudios en dos subcuencas forestales de coníferas y después de seis años de observación, una fue talada totalmente, después de lo cual el volumen medio anual del escurrimiento aumentó en unos 109 mm, como consecuencia de una disminución sustancial en la evaporación total o evapotranspiración potencial (Panman 1968).

A partir de 1910 en el estado de Colorado (EE.UU.) se hicieron mediciones durante nueve años en dos cuencas de 90 hectáreas aproximadamente cada una. Durante estos años el volumen medio anual de escurrimiento en ambas cuencas fue aproximadamente igual (155 mm). En la primavera de 1919 una de las cuencas fue talada y en los siete años posteriores el volumen del escurrimiento aumentó en 24 mm anuales con relación a la que no se taló (Bacta, 1928) también le adjudica el aumento del escurrimiento en la subcuenca talada a la disminución de la evapotranspiración potencial.

En los Cárpatos, Ucrania, en la Cuenca del Río Bistriza, en la extinta URSS, Oliinik *et al.* (1978), estudiaron dos subcuencas de 34.2 ha y 25.7 ha, con el 74.9 % y 84.4 % del área forestada, respectivamente, durante 8 años hidrológicos después de lo cual una de ellas (la segunda) fue talada, quedándole solamente el 29.6 % del área cubierta por bosque; como resultado de ello se obtuvo que después de la tala el volumen del escurrimiento anual aumentó en un 35 %, aumentando también el escurrimiento superficial y disminuyendo la evaporación total.

Anderson (1970) y Jiulet (1970), por su parte, fundamentados en sus investigaciones y en estudios de balances hídricos en pequeñas cuencas experimentales, plantean que la vegetación boscosa aumenta la evapotranspiración y disminuye el rendimiento anual de las cuencas. Según estos investigadores, las cortas totales de los bosques y como resultado el cambio de la vegetación forestal por pastos y otros cultivos, produce un aumento considerable del rendimiento hídrico.

Molchanov (1966) citado por Molina (1981) en sus estudios de zonas boscosas de Bulgaria, encontró que en los pastizales el coeficiente de escurrimiento era de hasta 0.95 y en las zonas cubiertas por vegetación boscosa, estos valores no excedían de 0.08.

Huish (1976) en el laboratorio de Coweeta, (USA) taló dos cuencas cubiertas de especies que se regeneran por rebrotes, dejando en ambos casos el producto de la tala sobre el suelo. A una de las cuencas se le cortaron los rebrotes cada año y a la otra se le dejó desarrollarse y obtuvo los resultados siguientes: en el primer caso se produjo un aumento del rendimiento hídrico anual del 65 % durante el primer año después de la tala y en el segundo caso, el comportamiento durante el primer año fue similar al primer caso, pero en los años posteriores fue disminuyendo el rendimiento hídrico producto, según el autor, de un aumento sustancial de la transpiración de la vegetación boscosa que se desarrolla en esta segunda cuenca.

Llull (1965), en su estudio de regresión múltiple de datos obtenidos durante 17 años en 137 cuencas hidrográficas en el noroeste de EE.UU. analizó 14 variables de clima, topografía y utilización de la tierra y encontró que las más significativas fueron la precipitación anual y el porcentaje de cubierta forestal en las cuencas, entre las cuales existía una dependencia directa y que ambas estaban relacionadas directamente con el rendimiento hídrico anual de las cuencas hidrográficas.

Como se puede apreciar, todos los estudios que se han citado, son relacionados con regiones de clima templado; en el trópico estos estudios son muy escasos, lo cual se corrobora en el documento elaborado por la UNESCO para la Conferencia Internacional sobre los resultados Prácticos y Científicos del D.H.I. (Decenio Hidrológico Internacional 1970) citado por Molina (1981).

En Kenia en estudios realizados referidos a la sustitución de bosques húmedos tropicales por plantaciones de té y la de los bosques montañosos de bambú, por plantaciones de pino se obtuvo que los aumentos iniciales del rendimiento hídrico obtenido, debido a las cortas de los bosques alcanzaron un 10 % y un 13 % respectivamente (Molina, 1981.)

El impacto del uso de la tierra sobre la escorrentía superficial media es una función que depende de numerosas variables, siendo las más importantes la cubierta vegetal que se

vincula fundamentalmente a la evapotranspiración (ETR) y a la capacidad de infiltración de los suelos y su capacidad para retener agua.

Un cambio en la cubierta del suelo de especies de menor a mayor ETR conducirá a un descenso en el caudal anual. De una revisión de 94 cuencas experimentales, Bosch y Hewlett (1982) concluyeron que el establecimiento de una cubierta forestal en un terreno con núcleos de vegetación aislados reduce la escorrentía superficial. Los bosques de coníferas, las especies madereras de hoja caduca, el monte bajo y las praderas tienen (en ese orden) una influencia decreciente en la escorrentía superficial.

Contrariamente, un cambio de una cubierta vegetal de mayor a menor ETR incrementará la escorrentía superficial media: una reducción en la cubierta forestal incrementa el aporte de agua (Bosch y Hewlett, 1982). El impacto, sin embargo, depende mucho de las prácticas de manejo y de los usos de la tierra alternativos. Una explotación forestal cuidadosa y selectiva tiene un efecto muy limitado o nulo sobre el caudal el que después del desarrollo de la nueva cubierta vegetal podría ser más alto, el mismo o inferior al valor original, dependiendo del tipo de vegetación (Bruijnzeel, 1990).

Una excepción a esta regla son los bosques «de niebla», que pueden interceptar más humedad (humedad ambiental, precipitación oculta) de la que consumen por la ETR (Bosch y Hewlett, 1982), y los bosques muy maduros, que dependiendo de las especies podrían consumir menos agua que la vegetación que se establece en ellos mismos después de la tala (Calder, 1998).

El caudal disminuye en el tiempo con el establecimiento de la nueva cubierta vegetal, pero las escalas temporales varían bastante. En zonas húmedas y cálidas, el efecto de la tala es más corto que en las zonas menos húmedas, debido al rápido crecimiento de la vegetación (Falkenmark y Chapman, 1989).

Los planteamientos anteriores parecen indicar que el bosque desempeña un papel negativo en el balance hídrico, sin embargo se puede afirmar que son mayores las ventajas, por ejemplo, The Amazon org. (2007), argumenta que los bosques naturales y las plantaciones de árboles son beneficiosos para el ciclo del agua, ya que determinan la disminución de la escorrentía y favorece la reposición del agua de los acuíferos. Las plantación de arboles se ha propuesto a menudo como medio para aumentar la

pluviosidad. Se estima que el 60 % de la lluvia que cae sobre los bosques perennes del Amazonas proviene de la evapotranspiración del bosque mismo.

1.1.1 Investigaciones de balances hídricos en Cuba.

En Cuba, las leyes de cambio del balance hídrico, en función de los factores hidrometeorológicos y la actividad económica del hombre en el bosque y uso del suelo, han sido poco estudiadas. Puede decirse que los estudios sobre hidrología forestal comenzaron en el año 1972, cuando Sagué *et al.* (1979) establecieron las parcelas de escurrimiento y 4 subcuencas experimentales en la Sierra del Rosario, para estudiar durante 5 años la influencia de la cobertura vegetal, la construcción de caminos y el terracedo de montaña en el escurrimiento superficial y la erosión total de la cuenca, obteniendo, entre otros resultados, que en el pasto natural se produce un escurrimiento superficial de hasta 8 veces mayor que en el bosque y que la erosión en el bosque es hasta 446 veces menor que en el pasto natural.

En el año 1974 el departamento de Suelos e Hidrología de la Dirección de Silvicultura del INDAF, realizó estudios hidrológico-forestales en la cuenca superior del río San Diego y en diferentes cuencas hidrográficas del país, utilizando parcelas de escurrimiento no permanentes de 100 m² de superficie, con aplicación de lluvia simulada, obteniéndose, producto de estas investigaciones, la metodología a seguir para la determinación del ancho de las fajas de protección forestal a las riberas de los ríos y embalses (Herrero 2003) y en la actualidad constituyen un indicador de manejo forestal sostenible en Cuba (Herrero 2005)

En estos estudios Perera (1975) obtuvo que, en plantaciones de coníferas de 8 años, el coeficiente de escurrimiento era de solo 0.15 o sea el 15 % del total de lluvia aplicada y que la erosión hídrica no excedía de 6.4 Kg./ha; mientras que en cultivos de maíz y yuca se produjeron coeficiente de escurrimiento de 0,78 y 0,28 respectivamente, y la erosión sobrepasaba lo 6000 Kg./ha en el primer caso y 1200 Kg/ha en el segundo. Geigel (1982) realizó, durante aproximadamente tres años en la precordillera norte de la Sierra Maestra (Estación Experimental Forestal de Guisa), estudios de pérdidas de suelo y agua sobre 4 sistemas diferentes de preparación del suelo (curvas a nivel, hoyos de plantación, lunetas individuales y terrazas de banco), obteniendo que donde

menos erosión y pérdida de agua por escurrimiento se produjo fue en el tratamiento de terrazas de banco, con 530 Kg/ha promedio por año y 46 mm promedio por año respectivamente.

1.2 Biogeoquímica de cuencas.

La primera vez que se propuso la técnica de la utilización de pequeñas cuencas para el estudio de los ciclos de nutrientes a través del ecosistema, fue en la Estación Experimental de Hubbard Brook, Estados Unidos, por Borman y Likens (1967). Aunque la zona experimental existía desde 1955, el comienzo del estudio de los ciclos minerales comenzó a partir del año 1963. En el torrente principal que es el que da nombre al bosque, desembocan una veintena de tributarios, que son en mayor medida objeto de estudio. Seis de ellas (W1 a W6), que son contiguas fueron objeto de la mayoría de trabajos realizados en el bosque experimental de Hubbard Brook, siempre tomando como referencia la cuenca W6 que se ha dejado inalterada, sirviendo como control de los cambios en la hidrología y el ciclo de nutrientes frente a la gestión forestal realizada.

El estudio de los ciclos biogeoquímico en las cuencas forestadas de Hubbard Brook, se inició bajo un modelo conceptual propuesto por Bormann y Likens (1967) en el que los nutrientes se encuentran almacenados en compartimentos dentro del ecosistema, y su transferencia de unos compartimientos a otros se realiza por medio de una serie de flujos. Los intercambios de energía, agua y nutrientes entre ecosistemas, se consideran como entradas o salidas que tienen origen meteorológico, geológico o biológico y éstos se pueden simplificar si las fronteras del ecosistema coinciden con los límites de una cuenca hidrográfica y se puede determinar el agua que llega a la misma y, si el sustrato es impermeable, todas las salidas de agua y nutrientes tienen que realizarse a través de la estación de aforo, ubicada en la parte más baja de la cuenca, bien anclada en la roca madre.

De esta forma, las entradas al sistema se reducen tan solo a las meteorológicas (deposición seca y húmeda y entradas gaseosas al sistema) y las salidas se reducen a los materiales que se exportan de la cuenca en forma disuelta particulada. A partir de ambas, se puede establecer el balance de los nutrientes en la cuenca, sin embargo

para conocer el funcionamiento tanto hidrológico como de la transferencia de nutriente a través del ecosistema, es necesario el estudio tanto de los almacenes o compartimientos, como de los flujos que los conectan.

La composición química del agua que drena una cuenca forestada es el resultado de un gran número de procesos, bióticos y abióticos, que tienen lugar en el seno del ecosistema. A Bormann y Likens (1967) se les ocurrió por primera vez utilizar el modelo de balance hidrológico de microcuencas para ampliar al análisis de los iones que entran con la precipitación y los que salen con el avenamiento y poder así proponer un modelo biogeoquímico del funcionamiento de los bosques (Likens 1977, Bormann y Likens 1979, Likens y Bormann 1995). Con este enfoque es posible estimar, no solo balances de agua, sino también balances de los diferentes nutrientes, e inicialmente se propuso el símil de que la composición de las aguas de escurrimiento podían servir para diagnosticar “el estado de salud” del ecosistema de forma similar a como el análisis de orina sirve para determinar si existe alguna patología en el enfermo (Escarré 1984). En esa línea se llevó a cabo probablemente la experiencia más drástica de deforestación ya que no solo se taló todo el bosque sino que se añadieron herbicidas para evitar la rápida regeneración de la vegetación herbácea y arbustiva y conseguir que se perdiese todo tipo de control biológico sobre las características químicas del agua de avenamiento (Likens 1970). A lo largo de una serie de años, junto al control de los caudales de avenamiento se realizó un seguimiento de las exportaciones de materiales en forma disuelta y particulada (Likens 1977), que junto a las medidas de volúmenes de precipitación y de los iones aportados en ella, hicieron posible conseguir una visión precisa del funcionamiento biogeoquímico del bosque mixto norteamericano.

Aparte de su interés teórico, esta aproximación ecológica tiene especial relevancia, además de para la ciencia forestal y para la ambiental, ya que el estudio coincidió con la fase crítica de deposición ácida en Estados Unidos, y el seguimiento de esa investigación ha permitido valorar, tanto la afectación que produce como el efecto de las medidas legislativas tomadas respecto a la emisión de gases acidificantes (Likens y Bormann 1995). Por otra parte, la información biogeoquímica que se obtiene en este tipo de investigaciones permite hacer estimaciones de tasas de meteorización (Barth

1961) que resultan de inestimable interés cuando se pretende delimitar las pérdidas de suelo asumibles en manejos que se busca sean sostenibles.

El análisis de las variaciones estacionales por la composición química del agua de los arroyos, junto con el estudio detallado de las crecidas de caudal permiten hacer alguna generalización sobre el origen de los iones según provengan de la meteorización de la roca (litofílicos), de la atmósfera (atmofílicos) o estén muy ligados a la materia orgánica (biofílicos) (Ávila, 1992; Piñol, 1992). Dado que la distribución de estos tres tipos de iones en el perfil del suelo es claramente distinta es lógico esperar que su abundancia en el agua de escurrimiento varíe en función de la profundidad del flujo de agua que drena el suelo y por ello, en los picos de caudal, es de esperar cambios de composición química asociados con el mayor o menor espesor de suelo lavado.

Los intentos de realizar estudios de biogeoquímica de ecosistema a nivel de cuenca, fuera de los Estados Unidos, no han sido extensos, aunque hay datos de cuencas experimentales en Nueva Zelanda (Loughlin, 1980), Australia y Japón (Nishimura, 1973). En Europa, Dupraz (1984) realizó balances de nutrientes en tres cuencas francesas, en Mont Lozere y cita los trabajos efectuados en una estación Belga (Buldgen *et al*, 1984) y en una inglesa. Con un enfoque más amplio, en una recopilación de cuencas europeas, Séller (1983) cita 40 cuencas en las que se dispone al menos de datos hidrológicos y de exportación de nutrientes.

En España, con la intención de estudiar los ciclos de nutrientes, se inició en 1977 un programa que utilizaba la cuenca como método de estudio, en el contexto de un convenio Hispano-Norteamericano, mediante el cual la Universidad Central y Autónoma de Barcelona junto con la de Alicante, intentaron aplicar al bosque típico mediterráneo el modelo utilizado en el bosque experimental de Hubbard Brook.

Los grupos de Barcelona comenzaron a trabajar en el Montseny, donde se aforó una primera cuenca cubierta de landas (TM5) en 1982 y la segunda (TM9) cubierta con un encinar en el año 1983. En este bosque se han llevado a cabo numerosos trabajos que están recopilados en Terradas y Roda (1988). El equipo de Alicante dedicó inicialmente bastante tiempo y esfuerzo en la búsqueda en posibles zonas de estudio. Inicialmente se comenzaron 4 zonas (Escarré 1982) pero se tomó como definitiva la zona de Prades

por la buena adecuación al estudio de ciclos de nutrientes en pequeñas cuencas forestadas.

En la zona de Prades (Montes de Poblet), se aforó en el año 1981 la cuenca de L'Avic. Hasta cinco años más tarde no se aforó la cuenca de Teula que es adyacente a L'Avic, y en el año 1988 se aforaron dos cuencas más. A lo largo de este tiempo, se han llevado a cabo, principalmente, estudios relacionados con las entradas de agua y nutrientes en la cuenca por medio de la precipitación global, traslocación y escurrimiento cortical Bellot (1989), la estima de las minero lomazas en las principales especies del encinar Clemente (1983), y las exportaciones de materiales disueltos y particulados con el agua de avenamiento (Lledo y Escarre, 1985). Durante los últimos años, el control de las entradas de agua y nutrientes se ha llevado a cabo por (Piñol (1990) quien profundiza en la comparación del comportamiento hidrológico y biogeoquímico de las cuencas de L'Avic y la de Teula.

Aparte de los bosques de Prades Montseny, existen en España otras zonas donde se utiliza la cuenca como unidad de estudio, por ejemplo la zona de la sierra de Filabrea con un enfoque similar al de la región de Poblet.

1.3. Historia de la Estación Hidrológica Forestal Amistad.

A través del proyecto UNESCO en el decenio hidrológico internacional, se escogió la cuenca del río San Diego como pionera para el estudio de cuencas hidrográficas en Cuba. Fue el Departamento de Suelo e Hidrología Forestal perteneciente al extinto INDAF (Instituto Nacional de Desarrollo y Aprovechamiento Forestal) quien asumió esta tarea. En el año 1974 comenzaron los estudios en la cuenca del río San Diego que consistieron en lo fundamental en: delimitación del parte agua a través de mapas y fotos aéreas, así como caminos principales, zona de erosión acelerada, cárcavas, ríos embalses y áreas de posible contaminación. Una vez concluida esta etapa se procedió al trazado de los perfiles transversales desde la orilla del cauce hasta el primer parte agua donde se tuvo en cuenta, la distancia del mismo, tipo de suelo, vegetación y pendiente; dicha caracterización sirvió para escoger los tipos de parcelas pareadas no permanentes (5x20 m) con lluvia artificial, las cuales permitieron determinar el escurrimiento superficial, la erosión e infiltración de los diferentes perfiles de la cuenca.

Además se efectuó un estudio de suelos de la cuenca y se confeccionó el mapa correspondiente que reflejó, la tenencia, uso y vocación de dichos suelos. Todo el conjunto del procesamiento de estas informaciones permitió concebir la fórmula Herrero-Melchanov (Herrero, 2003) para la determinación del ancho de las fajas forestales hidrorreguladoras en los márgenes de ríos y embalses, así como la manifestación de los procesos erosivos en dependencia del uso de la tierra, todo lo cual permitía a los actores involucrados hacer un manejo científico técnico de dicha cuenca. Posteriormente, se efectuaron trabajos similares en la parte central y oriental del archipiélago cubano, específicamente en las cuencas de los ríos Hanabanilla y Cauto hasta el cierre de la presa Gilbert, respectivamente.

A la vez que se iban efectuando las investigaciones mencionadas, se estaba pensando y localizando donde se pudiera, con carácter permanente y con lluvia natural, efectuar un estudio hidrológico forestal y fue en los Bermejales en el área forestal Galalón, donde se localizó, construyó y se equipó la Estación Hidrológica Forestal Amistad, entre 1976-1978.

Entre los objetivos de la Estación Hidrológica Forestal está garantizar la obtención de los datos iniciales necesarios para la solución de las siguientes tareas principales:

- 1- Determinar las características cualitativas y cuantitativas del balance hídrico en las subcuencas y parcelas.
- 2- Determinar las regularidades y los cambios del balance hídrico relacionado con las condiciones hidrometeorológicas y la actividad económica del hombre:
 - a) Influencia de distintos métodos de tala del bosque sobre el escurrimiento y la erosión.
 - b) El papel del bosque como regulador y protector de las aguas en dependencia de su composición, densidad y edad.
 - c) Balance de diferentes coberturas forestales.
 - d) Cambios en el escurrimiento y la erosión del suelo bajo la influencia de cultivos agrícolas.
 - e) Balance y dinámica de los fertilizantes minerales.

- 3- Evaluación de la erosión hídrica y determinación de sus particularidades.
- 4- Elaboración de las recomendaciones para el sector forestal sobre los cambios posibles del balance hídrico bajo la influencia de la actividad antrópica.

Para solucionar las tareas mencionadas anteriormente, en la Estación se realizan los siguientes trabajos.

- Observaciones, en las subcuencas y las parcelas, del escurrimiento líquido y sólido, así como de las sustancias disueltas.
- Observaciones meteorológicas.
- Observaciones de la evaporación desde la superficie del suelo y del agua.
- Observaciones del cambio de la humedad del suelo
- Determinación de cantidad de humedad obtenida en forma de rocío.
- Determinación de la velocidad del escurrimiento subterráneo.
- Observaciones de la interceptación de las precipitaciones por las copas de los bosques de coníferas y latifolias.
- Ejecución de manejos silvícolas en las subcuencas y parcelas de balance hídrico.
- Observaciones del microclima en las áreas forestales manejadas y no manejadas.

Para dar respuestas a todas estas interrogantes en la Estación se han desarrollado diferentes proyectos en sus 30 años de funcionamiento (1979-2008).

El primero pertenecía a un Problema Principal Estatal: “La influencia del bosque en el régimen hidrológico”.

Posteriormente se desarrolló otro proyecto que en parte era de continuación y con otros objetivos nuevos: “Estudios hidrológicos y sistemas agroforestales”.

A continuación se relaciona las investigaciones presentes:

- Bienes y Servicios Ambientales derivados de la tala selectiva y el raleo.
- Efecto del desarrollo de la regeneración natural en el rendimiento hídrico.
- Cambio de vegetación pinar por eucalipto y acacia y sus posibles cambios en el proceso de evapotranspiración y sus efectos en el rendimiento hídrico de la cuenca hidrográfica.
- Caracterización de los incendios forestales y sus efectos en el rendimiento hídrico, la erosión y la calidad del agua.
- Monitoreo sobre la presencia de las lluvias ácidas.

Entre las principales publicaciones e informes técnicos relacionados con los resultados de las investigaciones de la Estación Amistad se pueden mencionar los siguientes:

Herrero y Melchanov (1981)

Herrero, Molina y Melchanov (1983)

Melchanov y Herrero (1985)

Herrero *et al.* (1985)

Herrero, Melchanov y Plascencia (1987)

Mora, Plascencia, Toledo, Fernández (1989)

Melchanov y Mora (1990)

Herrero (1993)

Toledo, Fernández, Plascencia, Mora, Renda (1998)

Renda, Plascencia y Herrero (1999)

Renda, Plascencia, Herrero, Pérez, Vidal (2003)

Renda, Herrero y Plascencia. (2004)

Plascencia, Renda y Herrero (2004)

Plascencia, Renda y Herrero (2004)

Renda, Plascencia y Herrero (2005)

Plascencia, Escarré, Renda, Montalvo y Artiaga (2005)

Renda, Plascencia, Rodríguez, Herrero y Montalvo (2008)

Melchanov, Fremon y Herrero (2008)

Alvarez, Plascencia, Morales, Taño y Borrego (2008)

CAPÍTULO 2.- ÁREA DE ESTUDIO

2.1. Situación geográfica y superficie.

La provincia de Pinar del Río es la más occidental de Cuba con una superficie de 10925 km² dentro de la cual se encuentra la cuenca del río San Diego con 262 km² de extensión hasta el cierre de la presa La Juventud perteneciendo la mayor parte a la cordillera de Guaniguanico y el resto a la llanura aluvial de Pinar del Río, abarcando parte de los municipios La Palma, Consolación del Sur y Los Palacios. La Estación Amistad, situada en La cuenca del río San Diego, posee una superficie de 52 ha y su centro coincide con las coordenadas 22° 41' de latitud norte y 82° 26' de longitud oeste (Figura 2.1).



Figura 2.1. Ubicación del área de estudio

2.2. Características geológicas y geomorfológicas.

El archipiélago cubano está situado en la región del Caribe, una de las zonas más complejas del planeta desde el punto de vista geológico. En esta región se distinguen territorios de muy diversos tipos, tanto por su estructura como por la historia de su evolución geológica (Bermúdez 1961).

En la cuenca del río San Diego y la Estación Amistad la constitución geológica está representada por algunas de las formaciones más antiguas del país. Desde la cabecera del río San Diego hasta la parte media, incluyendo la totalidad de la estación Amistad, es característica la presencia de un complejo de rocas metamórficas (Alturas de Pizarra) que se incluyen dentro de la formación San Cayetano, cuya edad se le asigna al período Jurásico Inferior-Medio (Bermúdez 1961). Los materiales calizos (mogotes), que descansan sobre la formación anterior, resultan más jóvenes y se depositaron durante el periodo Jurasico Superior. Entre ellos, aparecen valles con pendientes casi nunca mayores de 6°. El relieve está representado por lomas de amplias laderas con pendientes variables cortadas por pequeños valles ligeramente ondulados y numerosas cañadas (Calzadilla *et al.* 1988); abundan las formas erosivas, erosivo-denudativas, altas, diseccionadas, premontañosas en forma de mesetas (ACC 1990).

2.3. Hidrografía.

La longitud del río San Diego desde su origen hasta la entrada en la presa Juventud es de 38 km. Sus afluentes, entre los que cabe mencionar a los arroyos Merceditas, Canalete, Diego, Pomarroza, las Catalinas, Cayo Cidra y Mogote, tienen longitudes que varían desde 1.2 y 7.0 km, siendo la densidad de drenaje de la cuenca 0.84 km/km² y el diseño de su red de forma dendrítica.

La densidad de drenaje en la estación Amistad es alta, y varía entre 11.4 y 18.2 km/km² y está constituida por corrientes intermitentes de primero a cuarto orden, las cuales drenan sus aguas al arroyo Bermejales que a su vez es afluente del río San Diego.

El relieve y la red hidrográfica de la zona de la estación están bien definidas y son típicas para los sistemas montañosos de Pinar del Río. Las alturas máximas de las

Subcuenca	Superficie (ha)	Pendiente media (%)	Altitud (msnm)			Densidad de drenaje (Km./Km ²)
			Máxima	Mínima	Media	
1	8.91	20.4	139	103	122.0	11.4
2	10.30	27.1	134	99	119.4	16.5
3	8.50	24.9	136	100	120.4	14.6
4	9.90	33.1	144	84	118.2	18.2

cuencas oscilan entre 120 y 150 m.s.n.m. El territorio esta surcado por cañadas, con

Tabla 2.1. Principales características de las subcuencas experimentales de la Estación Hidrológica Forestal Amistad.

laderas con pendientes entre 15 y 20 grado (Tabla 2.1).

La red hidrográfica drena sus aguas en el arroyo de los Bermejales, formando cuatro subcuencas pequeñas con parteaguas bien definidos, y que tienen superficies entre 8.50 y 10.30 ha (Figura 2.2).

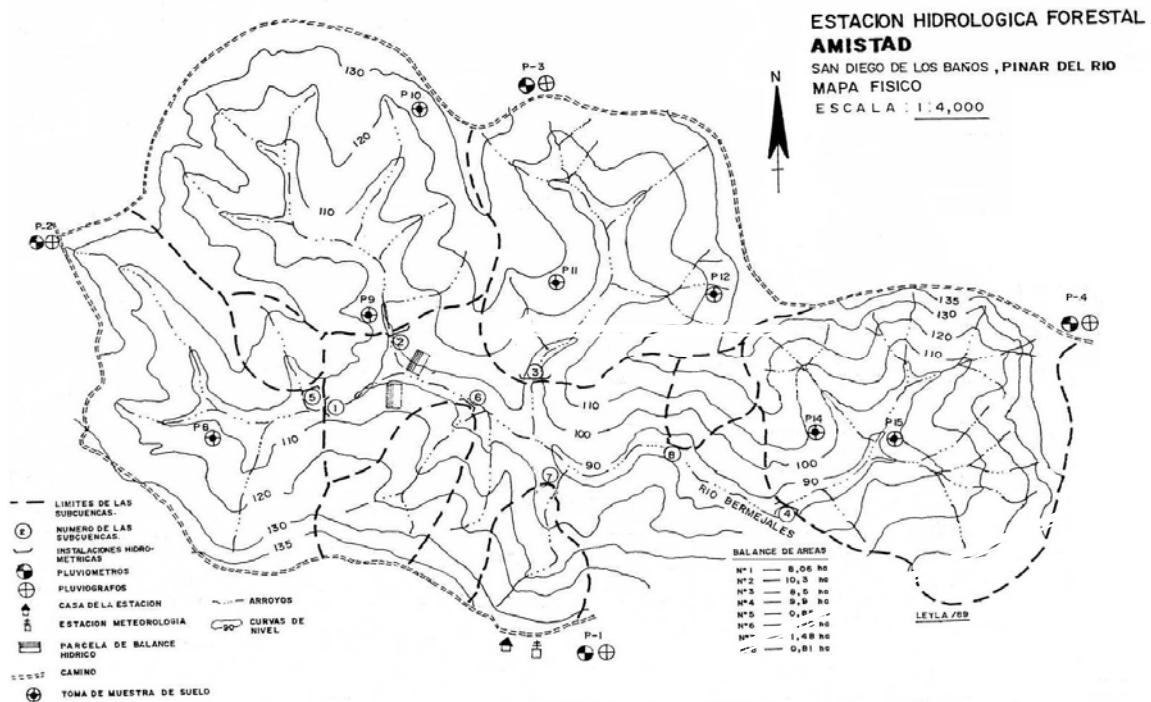


Figura 2.2. Delimitación del área de estudio y de la red de drenaje

2.4. Suelos.

Los tipos fundamentales de suelos que aparecen en la cuenca del río San Diego se ubican dentro de los agrupamientos Ferralíticos, Fersialíticos Pardos sin y con carbonatos, Aluviales y Esqueléticos (Instituto de Suelos 1980). Los suelos Ferralíticos Cuarcíticos Amarillo-Rojizos Lixiviados están distribuidos en la cuenca (Figura 2.3) fundamentalmente en la parte central y superior, ocupando áreas con relieve alomado hasta escarpado, son de profundidad variable, de muy baja fertilidad y poco resistentes a la erosión cuando se elimina la vegetación natural, que está constituida, fundamentalmente, por pinares (Calzadilla *et al.* 1988). Según FAO – UNESCO (1968) este tipo de suelo es Ferric Luvisol y de acuerdo con la Soil Taxonomy (1975) pertenece al Grande Grupo Ustults. Los suelos de la estación son muy pobres en nutrientes, el contenido de humus en los horizontes superiores es menos del 3 % y

disminuye bruscamente, como el de fósforo con la profundidad del perfil del suelo.

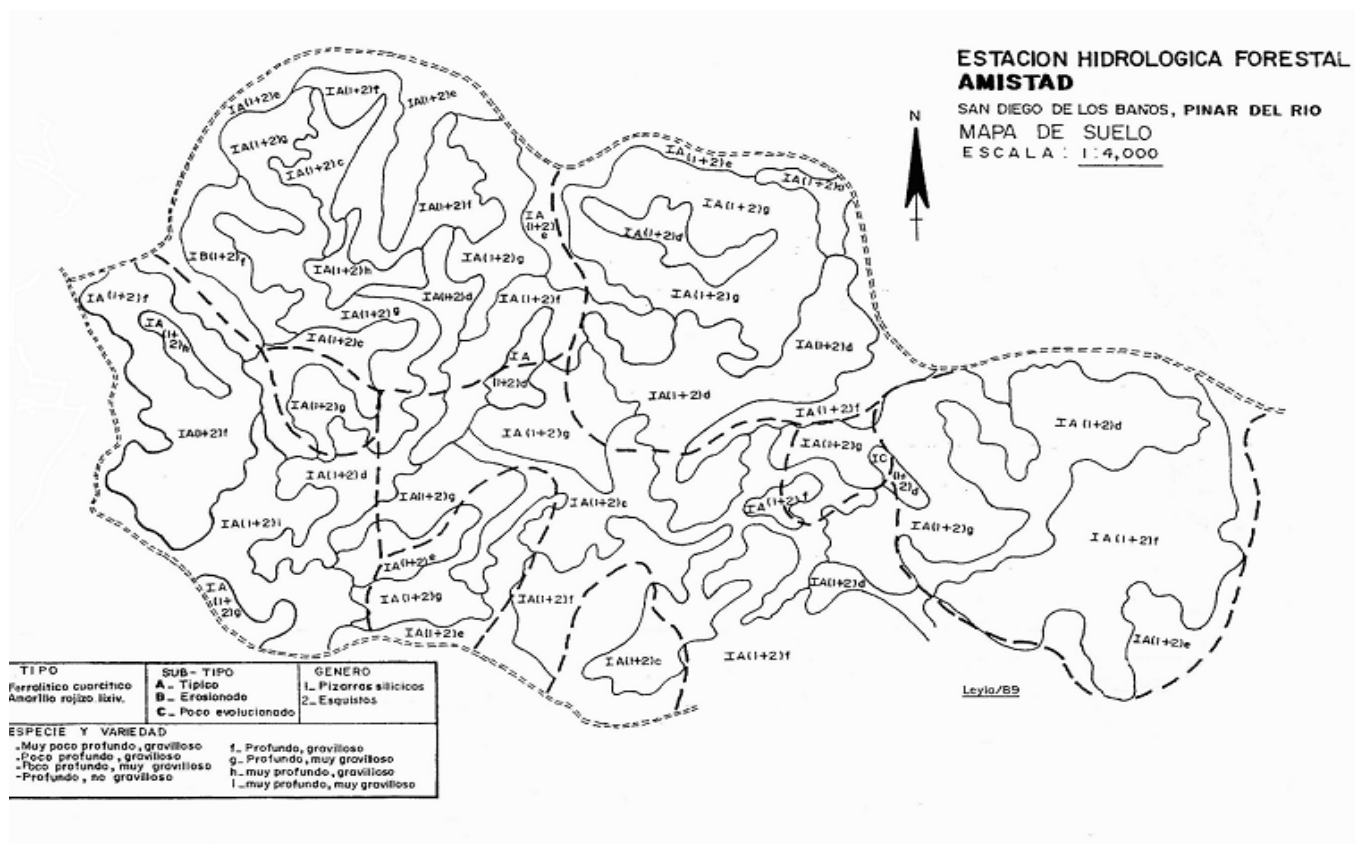


Figura 2.3. Mapa de suelos

Según la composición mecánica más del 50 % del suelo está constituido por partículas arenosas mayores de 0.2 mm, el resto se compone de arcilla y limo. Según esta composición la mayoría de los suelos son arenosos. Entre los suelos de las diferentes subcuencas existen pocas diferencias.

A continuación se hace una descripción de un perfil efectuado en una de las subcuencas donde se dan a conocer sus características, entre ellos datos químicos e hidrofísicos, dado a que es el tipo de suelo predominante.

Situación: Subcuenca 2

Clasificación: Rojo alomado erosionado sobre esquistos micáceos.

Drenaje Superficial: Excesivo.

Drenaje Interno: Bueno.

Vegetación Natural: Pinares

Topografía: Colinas

Material de origen: Esquisto micáceo.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ao	0 - 10	Pardo oscuro (7.5 YR 3/4) Loan, estructura granular fina, desarrollo moderado, friable, abundantes gravas de cuarzo arenisca de grano fino y algunas partículas de Micas, muchas raíces, no reacciona al CIH 10 %, transición brusca.
Ac	10 – 28	Rojizo con ligeras manchas muy tenues y amarillentas, loam arenoso, sin estructura definida, abundantes gravas de cuarzo y arenisca y partículas de mica, escasas raíces, no reacciona - al CIH 10 %, transición brusca.
C	28 – 40	Esquisto con mucha cantidad de mica en diferentes estados de meteorización.

Tabla 2.2. Descripción de un perfil de suelo de la subcuenca 2.

La descripción, indica el poco espesor del suelo, alto contenido de gravas cuarcíferas y una textura loamosa con predominio de la fracción arena, que hace suponer el intenso proceso erosivo a que está sometido.

Los datos químicos (Tabla 2.3) señalan un 4.15 % de contenido de materia orgánica en los primeros 10 cm de espesor, debido a la acumulación de hojarasca y otros restos orgánicos, lo cual fue estudiado por González Abreu *et al.* (1985). Nótese que en esta parte superior del perfil del suelo hay mayor contenido de nutrientes, lo que se corresponde con lo indicado por estos autores.

Tabla 2.3. Caracterización química

Profundidad cm	MO %	Nutrientes. Asimilables Kg/ha			pH H ₂ O	pH CIK	Acidez Hidrolítica me/100g	Cationes intercambiables me/100g					CCB me/100g
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O				Ca	Mg	Na	K	H	

0 -10	4.15	124	19	175	4.9	4.1	7.65	2.9	2.4	0.3	0.2	66	11.8
10-28	0.54	16	8	145	4.8	4	7.13	1.5	1.2	0.4	0.2	53	8.7

La reacción del medio es fuertemente ácida, por registrar el pH, tanto en agua como en cloruro, valores inferiores a 5. De forma análoga corrobora lo anterior el valor del hidrógeno intercambiable, que es mayor de 5 en ambos horizontes.

Del análisis textural e hidrofísico, (Tabla 2.4) se desprenden la predominancia de la arena (partículas >0.02 mm) sobre el resto de las fracciones, lo cual provoca que la capacidad de campo sea mediana y el suelo tenga poca retención de humedad para las plantas. De todo lo anterior, se deduce que este suelo debe tener un uso forestal, porque su fertilidad, tanto actual, como potencial es baja y ocupa posiciones topográficas difíciles para la agricultura.

Propiedad Hídricas %					Análisis Textural			
Perfil N°	Profundidad cm	Humedad Equivalente.	Capacidad de Campo	Coeficiente Marchitez	Arena >0.02	Limo 0.02-0.002	Arcilla <0.002mm	Textura
2	0-10	20.34	20.35	11.05	50.4	33.26	16.34	Loam
	10-20	16.62	16.99	9.03	57.0	24.26	18.34	Loam A

Tabla 2.4. Características hidrofísicas

2.5. Vegetación.

El reino florístico Neotropical, según estudios fitogeográficos de Good (1954) y Takhtadjan (1970), se divide en siete regiones. Cuba forma parte de la región del Caribe

que cuenta con dos subregiones: México-Venezuela y Antillana. La subregión Antillana cuenta con seis provincias, siendo Cuba la más occidental.

Dentro de la provincia fitogeográfica Cuba, la subprovincia Cuba occidental (*Occidento-Cubanicum*; Borhidi 1996), comprende la totalidad del área de la provincia político-administrativa Pinar del Río y el municipio especial Isla de la Juventud, además de la franja litoral meridional de La Habana y la ciénaga de Zapata al sur de Matanzas.

La provincia político-administrativa Pinar del Río, se extiende de SW a NE, ocupando una extensión de 10 904 km². Limita al oeste con el Canal de Yucatán, que la separa de Cabo Catoche, territorio mexicano por sólo 210 km; al Norte las aguas del Golfo de México, al Sur las del mar Caribe occidental y al Este con la provincia La Habana.

Su núcleo central esta formado por la cordillera de Guaniguanico (Figura 2.3) que se extiende por una superficie de 3710 km², que representa un tercio del territorio, bordeada casi en su totalidad por llanuras marginales que ocupan el resto de la provincia.

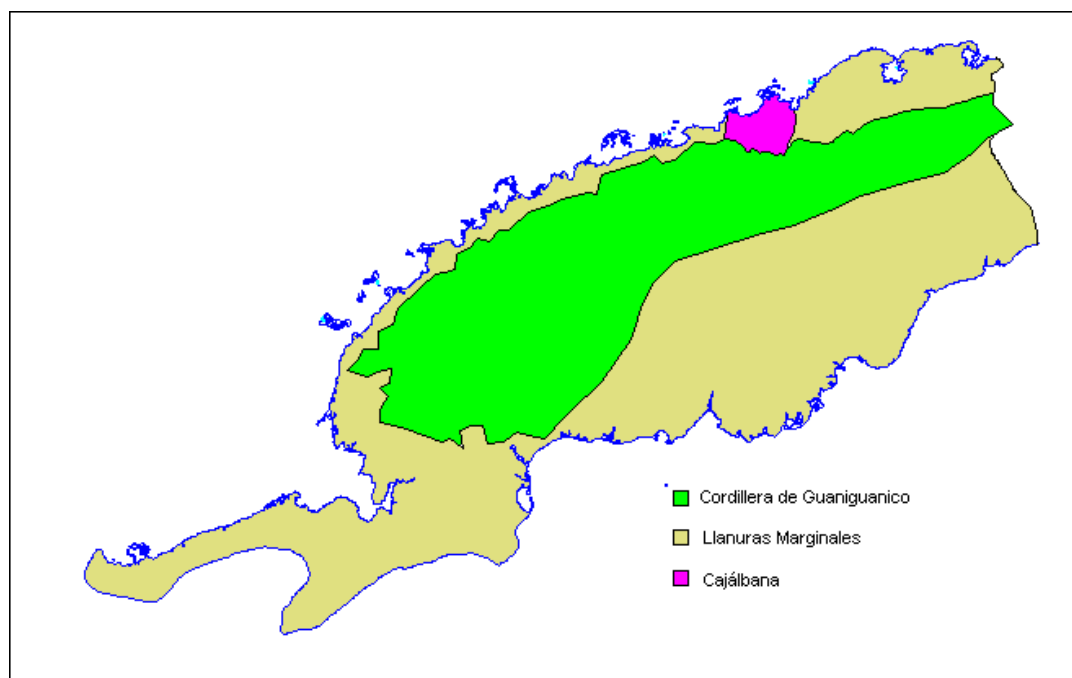


Figura 2.3 Cordillera de Guaniguanico bordeada casi en su totalidad por llanuras marginales, que conforman la Provincia Pinar del Río.

Contrario a lo reportado para la flora amenazada de Cuba (Berazaín *et al.*, 2005), donde predominan los arbustos, seguidos por las hierbas y los árboles, en Pinar del Río el tipo biológico mejor representado son las hierbas, seguido de arbustos, coincidiendo con el espectro biológico de la provincia, donde predominan pinares abiertos y sabanas seminaturales, ya que tienen suficiente luz, pero escasos nutrientes, lo que no favorece la abundancia de especies de gran biomasa. Las extensas áreas de sustratos arenoso-cuarcítico tributan a las altas cifras de hierbas amenazadas.

En Pinar del Río están representadas 12 formaciones boscosas que al cierre del año 2007 cubren una superficie de 435160 ha, de las cuales la más importante desde el punto de vista productivo es la formación de pinares con 128400 ha, lo cual representa el 30.82 % del área cubierta de bosques (Dirección Nacional Forestal 2008)

En la cuenca del río San Diego el pinar es la formación forestal más extendida, de gran importancia como productora de madera o protectora de los suelos y las aguas. Mientras que *Pinus tropicalis* Morelet tiende a ocupar las partes altas del relieve, *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea*, ocupa las partes más bajas. El estrato arbustivo está formado por bejuco colorado (*Serjania diversifolia* Jacq. Radlk), cordobán (*Tradescantia spathacea* Sw.), peralejo de costa (*Byrsonima roigii* Urb.) y el estrato herbáceo lo conforma principalmente el pajón (*Andropogon virginicus* L.)

El pinar es también la formación forestal predominante en la estación hidrológica Amistad (Figura 2.4). Aunque la masa es disetánea, se estimó, en el inicio del estudio, que la edad media era de alrededor de 25 años, clase de edad 3, grupo de edad natural, latizal. La altura promedio de los árboles era de 13 m y el diámetro normal de 16 cm.



Figura 2.4. Aspecto del pinar que cubre la Estación Hidrológica.

Asociados a los pinares pero ocupando las partes más bajas del relieve, a lo largo de las corrientes fluviales, se encuentran los bosques de galería (semicaducifolios sobre suelo ácido), encontrándose como especies principales, macurije (*Matayba apetala* Radlk), ocuje (*Calophyllum pinetorum* Bisse), almácigo (*Bursera simaruba* L. Sargentee), yaba (*Andira inerme* Sw HBK), jagua (*Genipa americana* L.) y pomarroza (*Syzygium jambos* (L.) Alston). La distribución de la vegetación por subcuencas y el número de árboles por hectáreas aparece en la Tabla 2.5.

No de sub-cuenca	Superficie					No de árboles por ha			Existencia m ³ / ha		
	Pinar		Hojosas		Total	Pinos	Hojosas	Total	Pinos	Hojosas	Total
	ha	%	ha	%							
1	7.71	86.5	1.20	13.5	8.91	354	150	504	56.8	6.2	63.0
2	8.10	78.6	2.20	21.4	10.30	413	223	636	80.6	7.0	87.6
3	6.90	81.2	1.60	18.8	8.50	288	325	613	65.9	12.5	78.6
4	7.32	73.9	2.58	26.1	9.90	262	266	528	71.0	4.2	75.2
Prom.	7.5	80	1.9	20	9.4	329	241	570	68.57	7.47	76.1

Tabla 2.5. Superficie de las formaciones boscosas, número de árboles y existencias maderables en las subcuencas experimentales, Estación Hidrológica Forestal “Amistad”

Cabe destacar, en el apartado de existencias, el predominio de pinar, algo menos acusado en la subcuenca 3, y la mayor biomasa total presente en la subcuenca 2 en contraste con la menor que corresponde a la 1, información esta que es de interés para poder interpretar de los datos de partición de la precipitación entre escurrimiento y evapotranspiración.

CAPÍTULO 3.- MATERIALES Y MÉTODOS.

La metodología de la investigación se fundamenta en la aplicación combinada de un conjunto de procedimientos sobre el sistema de medición, procesamiento y análisis estadísticos de las diferentes variables climáticas, hidrológicas, de sedimentos, escurrimientos corticales, rocío, interceptación, temperatura del aire, del agua y las características químicas de la misma. La consideración conjunta de algunas de estas estimas permiten, por ejemplo, formular el balance hídrico de las subcuencas, información de gran interés para valorar su manejo.

3.1. Modelo conceptual

El modelo conceptual utilizado en esta investigación es el del balance hídrico en cuencas con substrato impermeable que permite estimar la partición de la lluvia entre escurrimiento y evapotranspiración, y que ha sido utilizado muy frecuentemente en la investigación forestal desde principios del siglo XX, sobre todo para ver los efectos hidrológicos de las técnicas silvícolas. Para una cuenca con una roca madre impermeable que no permite pérdidas por infiltración se puede aceptar que

$$P = Q + ETR$$

P = Precipitación

Q = Escurrimiento

ETR = Evapotranspiración real

siempre que el agua retenida en el suelo sea la misma al principio y al final de la medición, es decir se establezca un año hidrológico de forma rigurosa (Lee 1980). De esa manera si las estimas de los volúmenes de lluvia y escurrimiento son precisos, es posible tener una buena medida del volumen de agua que se pierde en los procesos de transpiración y evaporación, la denominada evapotranspiración, que es una variable que no resulta fácil de medir por otras técnicas.

3.2. Elementos del clima.

Las observaciones permanentes del clima de la estación hidrometeorológica “Amistad” se realizan desde 1979. Dentro del área esta instalada una estación meteorológica estándar con un heliógrafo, un pluviómetro, pluviógrafo, evaporímetro, una caseta termométrica (máximo, mínimo, seco y húmedo con su higrotermógrafo), un anemómetro y un anemorrumbógrafo. Además de la estación meteorológica existen 4 puntos pluviométricos (pluviómetro y pluviógrafo) para medir las precipitaciones.

3.3. Trascolución, escurrimiento cortical, interceptación y rocío. Métodos de medición.

En el año 1982 se establecieron las 2 primeras parcelas, una de ellas con coníferas (pinar natural) y la otra en latifolias. La tercera, en coníferas, se estableció en 1984.

Se delimitaron parcelas de 30 m x 20 m en las cuales se colocaron pluviómetros en hileras bajo el dosel del bosque con una separación entre hileras de 10 m y entre cada pluviómetro entre 3 m y 5 m con el objetivo de medir la lámina de lluvia que penetra a través del dosel del bosque y llega a la superficie del suelo (trascolución).

Además se colocaron pluviómetros y pluviógrafos fuera del dosel para medir la cantidad e intensidad de las precipitaciones a cielo abierto (Figura 3.1)

Las características de estas parcelas se muestran en la tabla 3.1 (ver anexos)



Figura 3.1. Emplazamiento de pluviómetro y pluviógrafo a cielo abierto

Los árboles de control de las 3 parcelas fueron equipados con bandas acanaladas, las cuales recolectaban las aguas que escurrían por los fustes, producto de las precipitaciones y las conducían por medio de mangueras a tanques colectores (Figura 3.2). Se instalaron además 22 pluviómetros los cuales se distribuyeron en las 3 parcelas (6, 6, 10) cuya función era recolectar las precipitaciones debajo de la copa (trascolación), un pluviómetro y un pluviógrafo a cielo abierto que permitía conocer además de la cantidad de precipitaciones, la hora de comienzo y terminación, así como su duración e intensidad. En total se estudiaron 5 árboles de latifolias y 15 de coníferas. Las características de los árboles control se citan en la Tabla 3.2 (ver anexos). Las bandas acanaladas deben quedar dispuestas de forma tal que sólo recoja el agua que escurra por el tronco y no directamente de la lluvia. Las canaletas conducen el escurrimiento a tanques en los cuales se midió el volumen en litros inmediatamente

después de cada lluvia. Se consideraron lluvias diferentes cuando el intervalo entre ambas fue de 60 minutos o más.

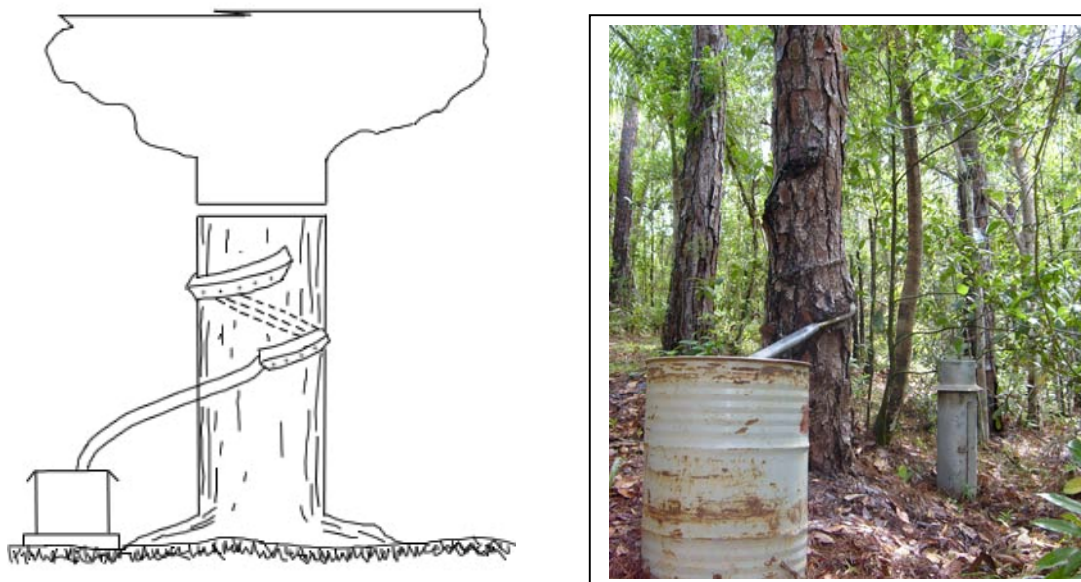


Figura 3.2. Árbol preparado para medir escurrimiento por el fuste y a la derecha en la foto, pluviómetro para medir la trascolación.

Se midió el diámetro a los árboles utilizados para canalizar el escurrimiento y en las parcelas se midió la proyección de copa.

Como ya se mencionó, la lluvia que cae sobre el bosque se fracciona en tres flujos principales: agua que atraviesa la copa de los árboles, la que escurre por el tronco y la que es interceptada por las copas, pudiendo expresarse según la siguiente ecuación:

$$P = T + E + I$$

Donde:

P = Precipitación al aire libre (se mide directamente).

T = Trascolación (se mide directamente y se expresa en mm)

E = Escurrimiento cortical (se mide directamente y se expresa en mm).

I = Interceptación por las copas (se calcula despejando el término: $I = P - (E + T)$ y se expresa en mm).

Las mediciones se realizaron inmediatamente después de terminada cada lluvia.

En el caso del escurrimiento cortical, para convertir el volumen de agua recolectado en los tanques a lámina (mm), se empleó la siguiente fórmula:

Lámina (mm) = $V \text{ (l)} / A$ donde

V = Agua escurrida por el fuste en litro.

A = Área de copa proyectada en m^2

Para la determinación del rocío en coníferas, latifolias y a cielo abierto se utilizaron cápsulas de cristal con algodón absorbente, las cuales se colocaron 3 hacia abajo y 3 hacia arriba en lugares a cielo abierto (estación climática), igual número debajo del bosque de coníferas y el bosque de galería. Las cápsulas hacia abajo tienen la finalidad de absorber la evaporación desde el suelo y las hacia arriba el rocío.

Estas cápsulas se colocan a la puesta del sol (al oscurecer) y se recogen antes de la salida del sol (al amanecer); y en cada uno de esos procedimientos son taradas. Por diferencia de peso se calcula el rocío en gramos, entonces la sumatoria de las 3 cápsulas se divide entre la sumatoria del área de las cápsulas y se multiplica por 10 y dará el rocío en según la siguiente formula:

$R = P/A \cdot 10$

R = rocío en mm.

P = peso del rocío en gramos.

A = área de la cápsula de cristal en cm^2 .

10 = Llevar cm a mm

3.4. Escurrimiento líquido

El diseño experimental de la estación La Amistad se realizó con la aproximación de las microcuencas pareadas (Lee 1980), donde se selecciona una microcuenca control (C2), para comparar con las microcuencas tratadas C1, C3 y C4 (Figura 3.3).



Figura 3.3. Ubicación de las microcuencas.

Como las acciones de manejo no se ejecutaron simultáneamente en todas las cuencas y hay algunas que duran incluso varios meses se hace indispensable explicar las fechas concretas de actuación en cada una de las cuatro subcuencas.

Subcuenca 1.- Se realizó únicamente una tala selectiva del 14 % de los árboles, los mayores de 26 cm de diámetro normal, durante los meses de abril y mayo de 1982. Se consideraron, para establecer la comparación, los 39 meses previos al manejo y los 31 posteriores.

Subcuenca 2.- Es la que se ha tomado siempre como control, no se ha realizado en ella ningún manejo desde el inicio de la estación hasta la actualidad.

Subcuenca 3.- Se efectuó una tala rasa entre el 26-6-1981 y el 9-10-1981. Posteriormente se hizo una preparación para la plantación que consiste en terraceo y hoyos de plantación entre el 26-11-1982 y el 27-1-1983 y la plantación se llevó a cabo en julio de 1983. Se tomaron, para comparar, los 29 meses previos a la tala rasa y los

14 que siguen a la actuación, pero también se comparan con los mismos 29 previos, los 23 meses posteriores a la preparación del terreno para la plantación.

Subcuenca 4- Se manejó con una tala rasa pero sin tocar el bosque de galería. Las fechas de actuación fueron entre el 19-10-1981 y el 10-3-1982. Después se hizo también una preparación del terreno para la plantación entre el 20-12-1982 y el 29-12-1982. La plantación se hizo también en julio de 1983. Es decir, se tienen en cuenta 33 meses previos al manejo y los 9 posteriores, aunque también se analiza el efecto de preparación del terreno en los 24 meses que siguieron al momento en que se practicó.

En cada una de las 4 subcuencas experimentales existe una estación de aforo en la que hay ubicado un limnógrafo automático que registra continuamente la variación del caudal. Para ello se colocaron vertedores triangulares fijos con un ángulo de 90° en el vértice, contruidos de metal y hormigón, como se ilustra en la Figura 3.4. Los vertedores tienen un capacidad de gasto de $1 \text{ m}^3/\text{seg}$, más el margen de seguridad para fenómenos extraordinarios como ciclones y lluvias torrenciales.



Figura 3.4. Instalaciones para la determinación del escurrimiento y la erosión.

Para la determinación de los indicadores: volumen (l), módulo de escurrimiento (l/seg.ha), lámina (mm) y el coeficiente de escurrimiento (%), fue necesario partir de la determinación diaria del caudal (l/seg), y se calcularon con las siguientes fórmulas:

Lámina de escurrimiento:
$$LE = \frac{V(l)}{\text{Área}(m^2)}$$

Módulo de Escurrimiento:
$$ME = \frac{V(l)}{T(seg.) * \text{Área}(ha.)}$$

Coeficiente de Escurrimiento:
$$CE = \frac{V(l)}{\text{Lluvia}(mm) * \text{Área}(m^2)}$$

Coeficiente de Evaporación Total:
$$E = \frac{\text{EvaporaciónTotal}(mm)}{\text{Lluvia}(mm)}$$

Donde: V: volumen en litros y T: tiempo en segundos

Para este tipo de vertedor específico, el valor del gasto de caudal corresponde a la expresión:

$$Q = 1.343 H^{2.47} \text{ l/seg.}$$

Donde Q es el gasto y H el nivel del agua sobre el vértice de el vertedor en cm.

En cada uno de los vertedores se efectuó el aforo volumétrico con el fin de obtener la curva de calibración de cada vertedor y con ella se elaboró la tabla de gasto para el procesamiento de la información que parte de la interpretación de la carta del limnógrafo que registra las observaciones. Teniendo en cuenta los días sin crecidas, los intervalos de cálculo se realizaron cada 6 horas y cuando se origina una crecida los intervalos estuvieron determinados por los puntos de cambio del hidrograma, que son registrados en un modelo.

Con estos mismos principios desde el punto de vista de las mediciones y el cálculo para determinar rendimiento hídrico y erosión en el área de la estación se construyeron y

equiparon cuatro parcela de balance hídrico en las cuales existen instalaciones que permiten determinar el escurrimiento superficial y subterráneo, estando delimitadas por un muro de hormigón a la redonda y por el centro dividiendo una parcela de la otra, además a una profundidad de 15 a 20 cm se le construyó un canal de hormigón que recolecta a través de ésta y un tubo hasta el vertedor donde es cuantificado. De igual forma se construyó un canal de hormigón profundo para cuantificar el escurrimiento subterráneo. Están ubicadas por parejas y divididas por un muro de hormigón, en una de ella se talo y se reforestó inmediatamente con su correspondiente testigo (parcela 1 y 2). En la otra pareja de parcela (3 y 4), la 3 se le aplicó una tala total y durante varios años fue sometida a cultivos anuales, con su correspondiente testigo (bosque natural). Estas parcelas tienen una superficie de 300 m² (10x30 m).

En las parcelas temporales se simulaban lluvias artificiales, con una motobomba, manguera y un pistón de bombero que de acuerdo a la regulación de éste y la velocidad del motor se obtenían lluvias de 5 intensidades (0.1 hasta 3 mm/mint), a través de una red de pluviómetros de cuñas ubicados en un área de 100 m² (5x20m), con sus respectivas canales colocadas en su parte inferior que permite determinar el escurrimiento superficial a través del vertedor en el cual se determinaba el gasto y en cuya caída se tomaba el muestreo, para determinar la erosión hídrica de dichas parcelas.

3.5. Hidroquímica.

Las muestras de agua de las subcuencas de la estación La Amistad se toman, de las corrientes antes de que éstas lleguen al remanso (aguas arriba del vertedor) o sea, fuera de la zona de presión. El seguimiento analítico se realiza de forma mensual, para lo cual se utilizan botellas de cristal con la capacidad de 1 litro. Para cada una de estas muestras de agua, se determinan las características cuantitativas del escurrimiento iónico. A cada muestra se le determinaron ocho parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica, y las concentraciones de HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+).

3.6. Erosión.

El método principal para determinar el escurrimiento de sedimentos que provienen de la cuenca o parcela es la selección de muestras únicas de la turbidez en un volumen de agua determinado, obtenido en el chorro del vertedor y con la medición simultánea del gasto en dicha instalación.

La determinación del escurrimiento de sedimentos se realiza durante todo el periodo húmedo. La cantidad de muestras, hora y fecha de recogida, se determinarán por la cantidad de sedimentos arrastrados de la cuenca ó parcela y su distribución, durante las 24 horas del día.

En caso de sedimentos (menores de 100 g/m^3) se tomarán tres muestras durante las 24 horas con el objetivo de caracterizar los cambios de agua y de turbidez durante el día. Las 3 muestras se mezclan y se determina la turbidez media del día. Durante el arrastre intensivo de los sedimentos y los cambios bruscos del escurrimiento, se tomarán más de 6 muestras durante el día. Las muestras de turbiedad se tomarán del chorro del agua. El volumen de la muestra única debe ser un litro.

Una vez tomadas las muestras se filtran a través de papel de filtro semilento debidamente tarado, los mismos se secan a temperatura ambiente y por diferencia de peso se calcula el escurrimiento del sólido en suspensión.

También se determinaron los sedimentos en el área de remanso en el período seco, tomando muestras en distintos puntos. Se determina el área ocupada por los sedimentos, su volumen, su peso húmedo y seco. El peso de estos sólidos entre el área de la subcuenca, se le suma al total anual de sólidos en suspensión y queda cuantificada la erosión total de la subcuenca. Los papeles de filtro se taran después de sometidos a estufa a una temperatura de $100 - 110^\circ\text{C}$ durante 2-3 horas y se colocarán en desecadora durante 20 – 30 minutos.

$$E = P.V$$

E = erosión g/l

P = peso sólido en suspensión en g

V = volumen del agua en el intervalo en litros.

3.7. Acidez de la lluvia.

Para determinar la presencia o no de las lluvias ácidas, se construyó una base de madera de 1.20 m de altura con un recipiente de plástico y se ubicó en el área abierta de la estación climática. Después de cada lluvia se recogía la muestra e inmediatamente se le determinaba el pH y la conductividad.

3.8. Métodos estadísticos

Para el calibrado de las diferentes subcuencas se aplicó un análisis de regresión lineal. Con la finalidad de comprobar el efecto de diferentes tratamientos en el rendimiento hídrico se aplicó también análisis de regresión lineal.

Los datos de los indicadores Precipitación (P), Escurrimiento (Q) y Evapotranspiración (ET) fueron sometidos a un análisis de correlación. Los datos de trascolación, escurrimiento cortical, interceptación, calidad del agua y la erosión se procesaron empleando diferentes procedimientos.

Para observar si hay tendencia al calentamiento en el área de la Estación se aplicaron análisis de regresión simple y polinomial a los valores de las temperaturas medias del arroyo y del aire respectivamente. También se ha usado, para la detección de tendencias temporales, el test de Mann Kendall, que es una prueba no paramétrica que se puede utilizar para identificar las tendencias en series de datos. El test compara las magnitudes relativas de una muestra de datos con ellos mismos. Una de las ventajas de este test, además de no tener una complejidad matemática excesiva, es que no requiere que los datos sigan ninguna distribución en particular.

El procedimiento asume que existe solamente un dato por período de tiempo, algunos autores utilizan la mediana, los valores medios o simplemente los totales. Los valores se evalúan en una serie de tiempo ordenada. Cada valor es comparado con todos los valores siguientes. Se asume que el valor inicial del estadístico S de Mann Kendall es cero (no hay tendencia). Si el valor de un dato en el período posterior es mayor que el valor en el período precedente S se incrementa en 1. De otra manera si el valor del dato en el período posterior es menor que el del período precedente, S se disminuye en 1. El resultado neto es el valor del estadístico S

Para el caso en que $n > 10$, la distribución muestral de S es según una normal estándar, donde

$$Z = \frac{S - 1}{[VAR(S)]^{1/2}} \quad si \quad S > 0$$

$$Z = 0 \quad si \quad S = 0$$

$$Z = \frac{S + 1}{[VAR(S)]^{1/2}} \quad si \quad S < 0$$

Existe una corrección para empates (Salas 1993, citado por Birhart et. al 2002)

La hipótesis nula (H_0), que representa ausencia de tendencia, es rechazada si el valor absoluto de Z es mayor que $Z_{\alpha/2}$. Si se rechaza H_0 y Z es positivo la tendencia es creciente, si se rechaza H_0 y Z es negativo significa que la tendencia es decreciente.

Para el caso en que $n > 10$ la varianza de S se calcula mediante la expresión:

$$VarS = \frac{1}{18} \left[(n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5)) \right]$$

Donde n es el número de datos, g es el número de grupos empatados (un grupo empatado es un conjunto de datos muestrales que tienen el mismo valor y t_p es el número de datos en el p -ésimo grupo).

Para comprobar que hay efectos estacionales entre las épocas se realizaron las pruebas no paramétricas de comparación de muestras relacionadas. Las pruebas de los rangos con signo de Wilcoxon y la Prueba de los signos. Habiéndose detectado diferencias significativas, entre épocas, tal como se esperaba, se decidió hacer el análisis de tendencia por separado mediante el test de Mann Kendall.

Se han elaborado también gráficos de las series desestacionalizadas. Para ello se utilizaron los valores medios o totales de cada época del año, mayo-octubre y noviembre-abril. Se representaron solo aquellas series en las que el test de Mann Kendall detectó presencia de tendencia. Se desestacionalizaron las series utilizando período 2 (2 períodos estacionales en el año). Para cada variable se presenta el gráfico de las medias o totales de cada período en la serie original, en la serie

desestacionalizada y los gráficos por épocas separadas utilizando también la serie desestacionalizada.

En todos los análisis estadísticos realizados se utilizó un nivel de significación del 5% para una confiabilidad de las predicciones realizadas del 95%. Los procesamientos se realizaron en el paquete estadístico SPSS.

CAPÍTULO 4. Características climáticas de la Estación Hidrológica Forestal Amistad.

4.1 Introducción

Cuando se iniciaron las observaciones hidrometeorológicas en la estación Amistad, en el año 1979, mientras que ya existía alguna bibliografía sobre el fenómeno de las lluvias ácidas, especialmente las que afectaban al hemisferio norte (Cogbill y Likens 1974, Cogbill 1976), en muy pocas ocasiones se había hecho referencia a la posibilidad de un cambio climático global. Aunque se constataba la existencia de una tendencia clara en el incremento de CO₂ atmosférico, en especial en el caso paradigmático del volcán Mauna Loa (Keeling *et al.* 1989) los conocimientos sobre la importancia de la composición de la atmósfera en el reforzamiento del efecto invernadero eran todavía muy fragmentarios (Solomon *et al.* 1985) se sabía que en los últimos 150000 años las oscilaciones de la concentración de CO₂ habían sido relevantes (Barnola *et al.* 1987) y, sobre todo, se tenía la gran dificultad de distinguir entre la que se puede denominar variabilidad climática “natural” y la inducida por cambios debidos a la acción antropógena, que solamente en los últimos años, ha sido posible valorar (Hegerl *et al.* 2007).

Durante los más de 30 años de funcionamiento de la estación Amistad han visto la luz numerosos libros sobre diversos aspectos del cambio climático (entre otros muchos Graves y Reavey 1996, Lamb 1995, Wrigth *et al.* 1993, Moore *et al.* 1996) y sobre todo los sucesivos rigurosos informes del Panel Intergubernamental de Expertos (IPCC 1990 hasta IPCC 2007), en los que, pese a presiones de poderosos “lobbys” relacionados con la industria del petróleo, se han ido aportando informaciones concluyentes que permiten afirmar que el calentamiento del planeta es una consecuencia de los aportes de gases con efecto invernadero a la atmósfera, realizados especialmente durante el siglo XX, así como de la introducción de cambios en el uso del territorio que afectan, también, al ciclo del carbono (Schlesinger 2006).

En el caso de Cuba, la investigación sobre el cambio climático se inicia en 1990 y la primera aportación integral es la de Centella *et al.* 2001.

En estas circunstancias de coincidencia entre el periodo de registro de la estación hidrometeorológica y el del desarrollo de investigaciones nacionales e internacionales sobre el fenómeno del cambio climático, son objetivos del presente capítulo los siguientes:

- Describir las características climáticas de la estación forestal Amistad.
- Indagar si se aprecian tendencias en algunas de las variables climáticas analizadas en correspondencia con las descritas hasta el momento para Cuba.

En concordancia con lo encontrado en las investigaciones precedentes, realizadas en la isla y en el área caribeña, las principales hipótesis de partida que se pueden tomar en el análisis de esta serie climática son:

- Durante el período se produce un incremento de la temperatura media.
- A lo largo del período no es de esperar una variación significativa de los valores anuales de precipitación, humedad relativa media, evaporación, ni horas de sol.
- Podrían aparecer tendencias en el análisis, por separado, de las variables climáticas correspondientes a las épocas húmeda y seca.
- La desestacionalización de los datos de estas series debe mejorar considerablemente el ajuste de las regresiones lineales.

4.2. Pauta de análisis de la serie temporal de las variables.

Para conseguir un análisis completo de la información climática colectada en la estación a lo largo de las tres últimas décadas, se va a seguir el siguiente patrón expositivo, que se repetirá en cada una de las variables analizadas;

- Descripción, a base de histogramas, de la evolución a lo largo del periodo y de los valores medios en cada uno de los meses.
- Un primer análisis de tendencia, con la serie de datos mensuales, por medio de la prueba de rachas.
- El análisis de regresión de los valores medios anuales, sin y con desestacionalización.
- Aplicación de la prueba de Mann-Kendall, tanto a los datos anuales como a los medios correspondientes a las estaciones seca y húmeda.

Dado que las características de las épocas lluviosa y seca, son tan diferentes en el clima cubano, cabría esperar, por ejemplo, que la tendencia en las variaciones fuese opuesta en una y otra fase del año, lo que probablemente no se apreciaría en la variación interanual. Desde el punto de vista estadístico se puede justificar el análisis de la tendencia, por separado, de las dos épocas debido a que la mayoría de las variables presentan valores diferentes, con significación estadística, según se puede apreciar en la Tablas 4.1 y 4.2 que muestran los resultados de una prueba de rangos con signo de Wilcoxon y una prueba de signos. Salvo en el número de horas de sol, en todas las demás variables comparadas, los valores medios de las épocas de lluvia y seca, son significativamente distintos.

Tabla 4.1. Prueba de los rangos con signo de

Estadísticos de contraste^c

	Evaporación total período seco - Evaporación total período lluvioso	Precipitación total período seco - Precipitación total período lluvioso	Humedad relativa media período seco - Humedad relativa media período lluvioso	Temperatura mínima media período seco - Temperatura mínima media período lluvioso	Temperatura mínima absoluta período seco - Temperatura mínima absoluta período lluvioso	Temperatura máxima media período seco - Temperatura máxima media período lluvioso	Temperatura máxima absoluta período seco - Temperatura máxima absoluta período lluvioso	Horas de sol total período seco - Horas de sol total período lluvioso	Temperatura aire período seco - Temperatura aire período lluvioso
Z	-4,286 ^a	-4,457 ^a	-4,172 ^a	-4,458 ^a	-4,457 ^a	-4,458 ^a	-4,458 ^a	-,571 ^b	-4,457 ^a
Sig. asintót. (bilateral)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,568	,000

a. Basado en los rangos positivos.

b. Basado en los rangos negativos.

c. Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon

Tabla 4.2. Prueba de los signos Wilcoxon

Estadísticos de contraste ^b										
	Evaporación total período seco - Evaporación total período lluvioso	Precipitación total período seco - Precipitación total período lluvioso	Humedad relativa media período seco - Humedad relativa media período lluvioso	Temperatura mínima media período seco - Temperatura mínima media período lluvioso	Temperatura mínima absoluta período seco - Temperatura mínima absoluta período lluvioso	Temperatura máxima media período seco - Temperatura máxima media período lluvioso	Temperatura máxima absoluta período seco - Temperatura máxima absoluta período lluvioso	Horas de sol total período seco - Horas de sol total período lluvioso	Temperatura aire período seco - Temperatura aire período lluvioso	
Sig. exacta (bilateral) Z	,000 ^a	-4,903 ,000	,000 ^a	-4,903 ,000	-4,903 ,000	-4,903 ,000	-4,903 ,000	-,196 ,845	-4,903 ,000	
Sig. asintót. (bilateral)										

a. Se ha usado la distribución binomial.

b. Prueba de los signos

4.3 Temperaturas

La variable temperatura es sin duda la que más reclama la atención en un proceso de cambio climático que lleva a un calentamiento de la atmósfera del planeta. Existen una serie de mecanismos, digamos “naturales”, de cambio climático como son la variabilidad de la radiación emitida por el sol, los procesos de tectónica de placas, la composición química de la atmósfera, entre otros, que aparecen bien resumidos en Bonan (2008).

Aunque las investigaciones sobre los cambios en la temperatura del aire se extienden en el pasado hasta alrededor de los 250000 años, el mayor esfuerzo de los climatólogos se centra en el análisis de lo ocurrido durante el siglo XX, en el que encuentran una diferencia muy clara entre la primera y la segunda mitad (Thompson *et al.* 2008). Entre los años 1906 y 2005 la temperatura media del aire se incrementó 0.74 °C (Trenberth *et al.* 2007). Entre 1979 y 2005 la temperatura media global aumento 0.16 °C por década, y once de los doce años del período 1995-2006 están entre los doce más cálidos observados desde 1850 (Bonan 2008). Cuando se analizan períodos de tiempo más largos hay que recurrir a los anillos de crecimiento de los árboles más longevos y los núcleos de hielo. Las mejores estimas muestran un calentamiento de 0.8 °C en los últimos cien años. Cuando estas medidas, que deben tener en cuenta el efecto de que muchas estaciones meteorológicas han pasado de rurales a urbanas, se consideran conjuntamente con los datos paleoclimáticos, se pone de manifiesto que el final del siglo XX es el periodo más cálido de los últimos mil años de la historia del planeta (Jones 2009). Las evidencias, con todas las reservas necesarias, y el máximo rigor, de que actualmente la tierra se encuentra en un proceso de calentamiento, que, además, es atribuible a la acción antropógena se pueden encontrar en IPCC (2007).

4.3.1 Temperatura media del aire.

Las temperaturas medias registradas en el periodo que va desde 1979 a 2005 aparecen en la figura 4-1. Se observa con claridad que el año 1981 se produjo el mínimo valor anual (23.4 °C) que coincidió precisamente con el año menos lluvioso (solo 1104 mm) mientras que en 1998 se dio la media anual más elevada de la etapa analizada (24.9 °C).

En la figura 4-2 se pueden ver los valores medios que corresponden a los meses del año, y que, en esta estación alcanzan sus máximos, en los meses de junio, julio y agosto con 26.3 °C, 26.2 °C y 26.0 °C, muy similares entre si y que están acordes a la isoterma que corresponde a esta zona que es la de 26 °C (ICGC 1978). Por el contrario, los meses más fríos, en periodo analizado, son los de diciembre y enero con 21.5 °C y

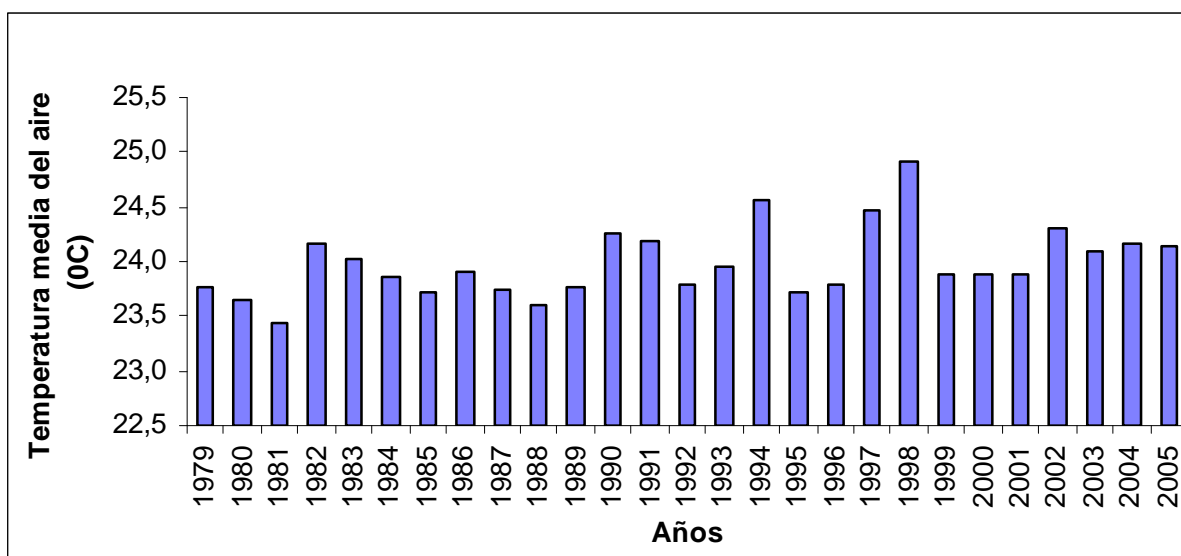


Figura 4-1 Temperatura media del aire por años en el periodo 1979-2005.

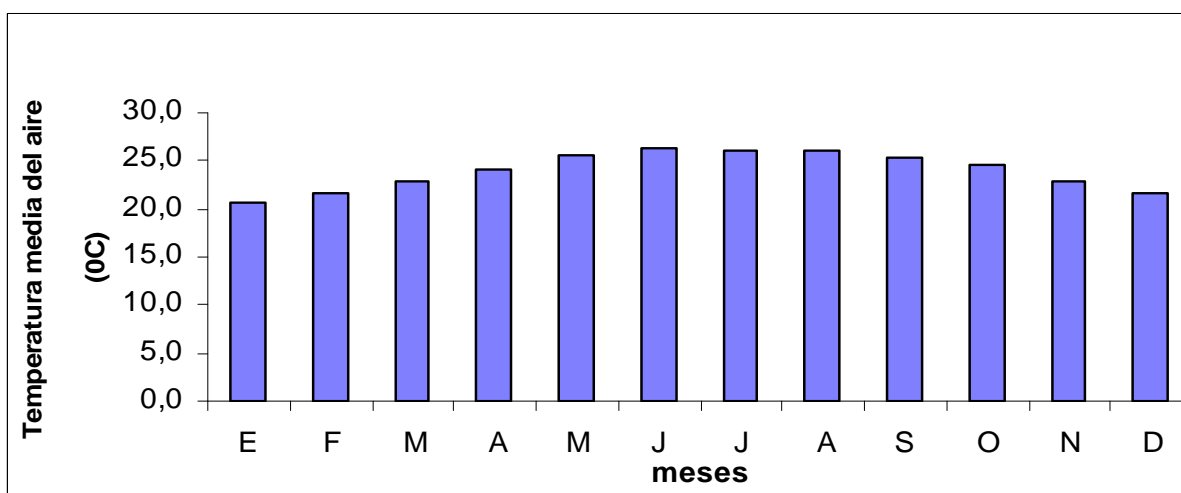


Figura 4-2 Temperaturas mensuales medias correspondientes al período 1979-2005.

20.5 °C respectivamente, muy parecido a la media de la parte occidental del territorio de 20 a 22 °C, y a la Isotherma de dicha zona (21 °C).

La temperatura media del aire de 24 °C registrada en la Estación Amistad se corresponde bien con la isoterma para la zona de estudio (Ibarra *et al.*, 1978). Así pues, sobre la temperatura media del aire podemos decir que los indicadores de temperatura de la Estación Amistad se corresponden con las isotermas plasmadas en el Atlas de Cuba para esta región.

Análisis de tendencias.

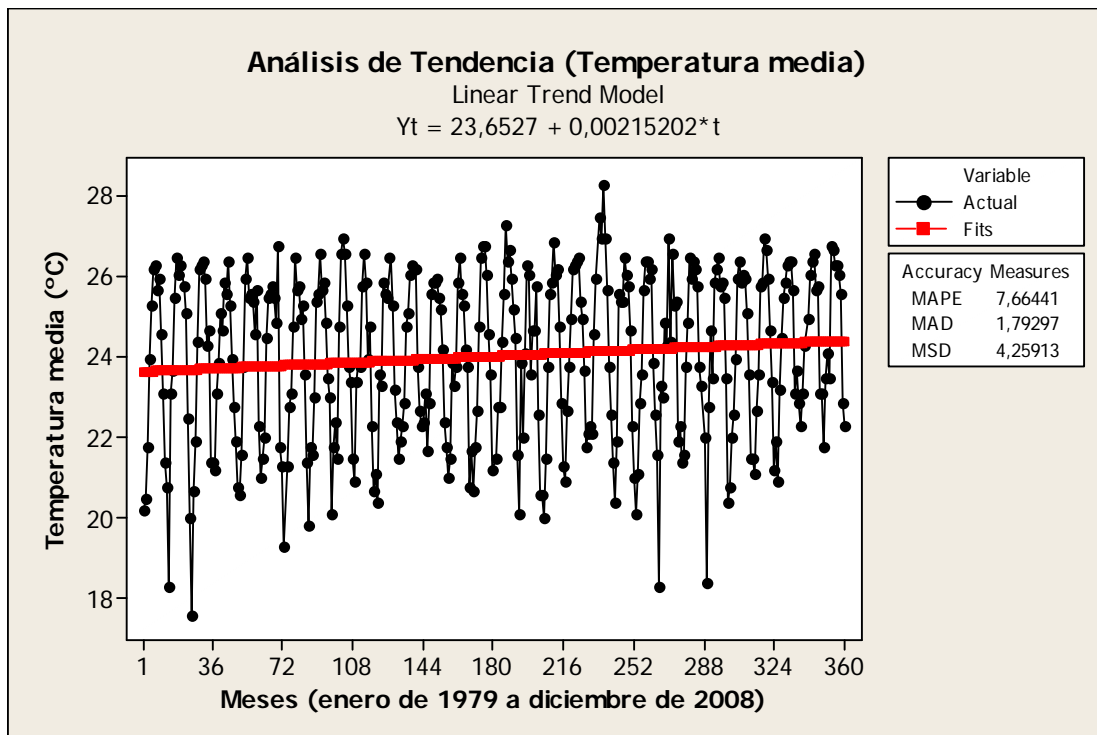
Con el objetivo de comprobar la existencia de tendencias en los datos meteorológicos en el periodo 1979 – 2005, los mismos fueron procesados empleando el paquete estadístico SPSS v. 15.0 y MINITAB 14.

Según Hoel (1981) al estudiar series cronológicas la primera pregunta que necesita contestarse es si la serie realmente depende del tiempo, y para ello se puede emplear la prueba de rachas. Lo que a continuación se presentan son los resultados aplicados a la base de datos por meses de esos 30 años.

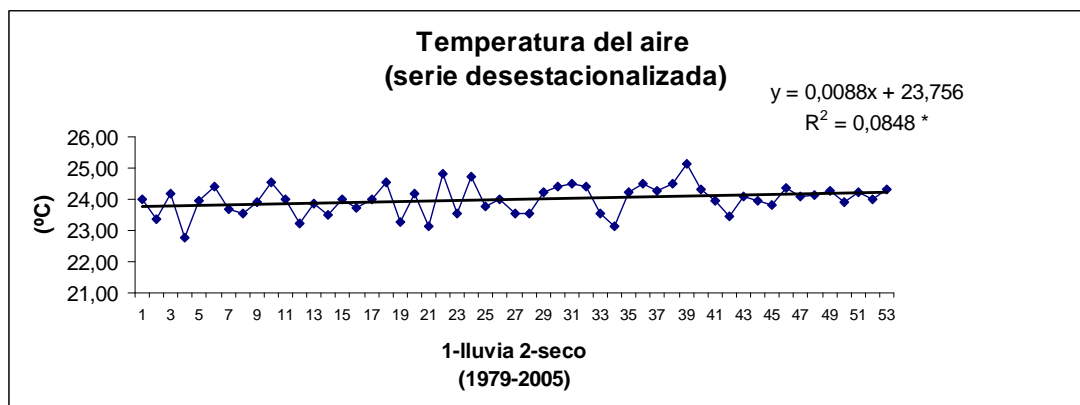
Prueba de rachas

	Temperatura media (°C)
Valor de prueba(a)	24,4
Casos < Valor de prueba	179
Casos >= Valor de prueba	181
Casos en total	360
Número de rachas	71
Z	-11,611
Sig. asintót. (bilateral)	,000

a Mediana

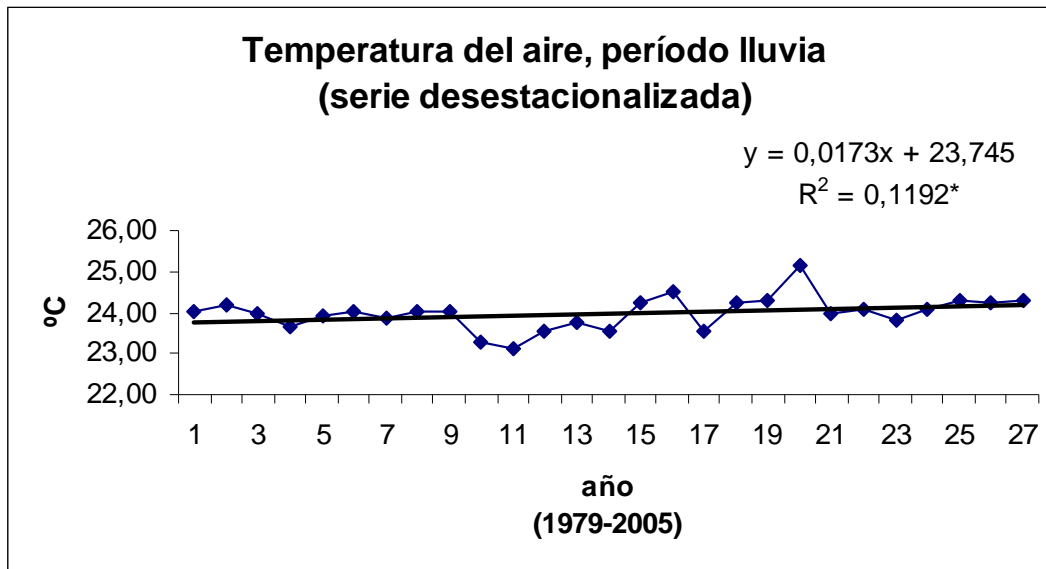


Se puede rechazar la hipótesis de que los sucesos ocurren al azar y concluir que la secuencia de observaciones estudiadas no es aleatoria, sino que manifiesta cierta tendencia en su comportamiento. Se realizaron varios ajustes a los modelos y el que se muestra a continuación fue quien arrojó mejores estadísticos en cuanto a la precisión (MAD = 1,79 y MSD = 4,26), es decir menor variabilidad en el ajuste.



El análisis de la regresión lineal de esta variable pone de manifiesto la existencia de una pendiente positiva significativa con valor de $R^2 = 0.202$ ($p < 0.05$) y lo mismo ocurre

cuando se suprime la estacionalidad, lo que, además, produce una mejoría del ajuste ya que el valor de R^2 es de 0.309 ($p = 0.034$).



En el análisis por años se observa, pues, una tendencia al incremento de la temperatura media. Al evaluar el modelo se obtiene que el valor inicial es de 23,65 °C y el final es de 24,42 °C (0.77 °C de aumento). De los 30 años analizados 12 están por encima de la media (40 %), pero de estos 12 valores nueve ocurren en los últimos 15 años (75 %).

También se observa una tendencia creciente con la aplicación de la prueba de Mann-Kendall con la que se obtiene un valor de $S = 122$ y una $Z = 2.669$ ($p = 0.996$). Ahora bien, cuando esta misma prueba se aplica, por separado, a la serie de los valores medios de temperatura del aire de los períodos húmedo y seco, resulta muy interesante constatar que, mientras que para el primero también se puede apreciar un incremento significativo de esta variable ($S = 91$, $Z = 1,987$, $p = 0.976$) en el segundo caso no existe significación. La regresión lineal de los valores de temperatura media anual de los períodos húmedos también proporciona un ajuste significativo ($R^2 = 0.157$, $p < 0.05$).

4.3.2. Temperaturas mínima media y mínima absoluta.

Con respecto a las temperaturas extremas (máxima y mínima) la variabilidad espacial de sus valores medios mensuales es apreciable en los diferentes meses del año y también de un mes a otro. Las regiones montañosas del país resultan las más frías, no tanto por la ocurrencia de mínimas notables, sino porque las máximas no llegan a alcanzar valores elevados (INSMET, s/f).

En la figura 4-3 aparecen los valores de las mínimas medias de la Estación Amistad para el período de estudio. Al igual que ocurría con las temperaturas medias el mayor valor corresponde al año 1998 y el menor a 1981. En este caso la media mínima para el periodo 1979-2005 es de 18.4 °C, y es en el mes de enero (Figura 4-4) cuando se da el valor más bajo, con 14.9 °C, que en este caso está 1.1 °C por debajo de la isoterma representada para esta zona que es de 16 °C (González, C. *et al.* 1987). El mayor valor corresponde a junio con 20.9 °C, en este mes que es el más cálido y que en este caso, al igual que el anterior, esta por debajo en 1.1 °C respecto a la isoterma del área que es 22 °C.

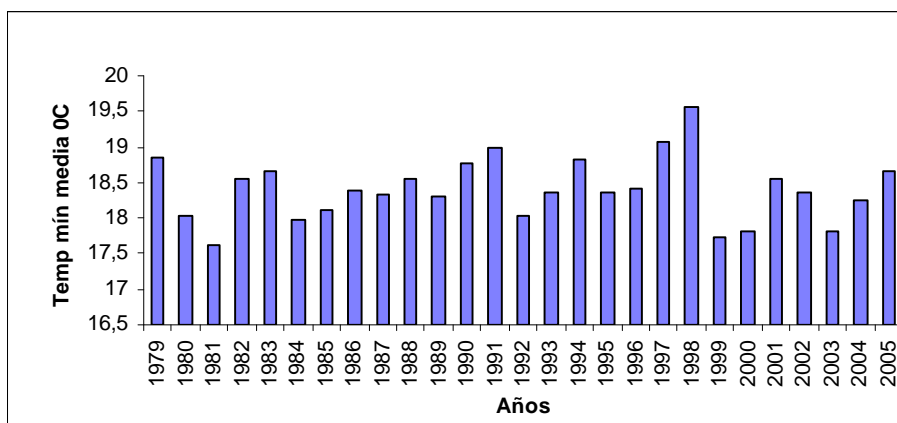


Figura 4-3. Valores de la temperatura mínima media a lo largo del período de estudio.

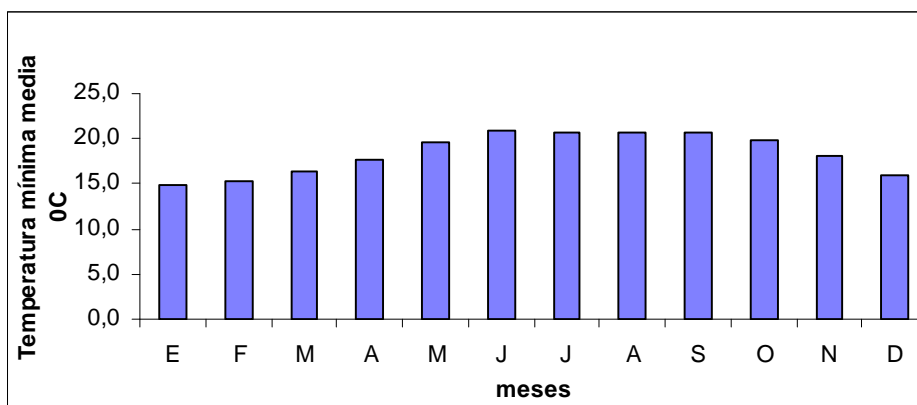


Figura 4-4. Temperaturas mínimas medias correspondientes a cada mes.

Las temperaturas mínimas absolutas estimadas durante el período de estudio en la Estación Amistad vienen en la figura 4-5. Entre ellas, el valor mínimo corresponde claramente al año 2002 y los máximos a 1990 y 1991. En la figura 4-6 aparecen los valores medios de las temperaturas mínimas absolutas que corresponden a cada uno de los meses del año. El menor de estos valores es de 8.3 °C y corresponde, como es de esperar, al mes de enero. Por el contrario, para agosto se obtiene la mayor temperatura mínima absoluta media, que es de 18 °C, no mucho mayor que las que corresponden a julio y septiembre, 17.5 °C y 17.6 °C, respectivamente.

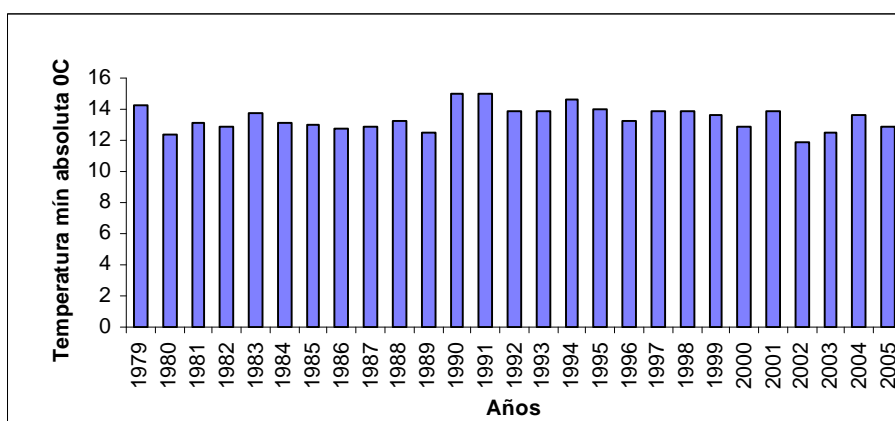


Figura 4.5. Evolución de las temperaturas mínimas absolutas durante el período comprendido entre 1979 y 2005.

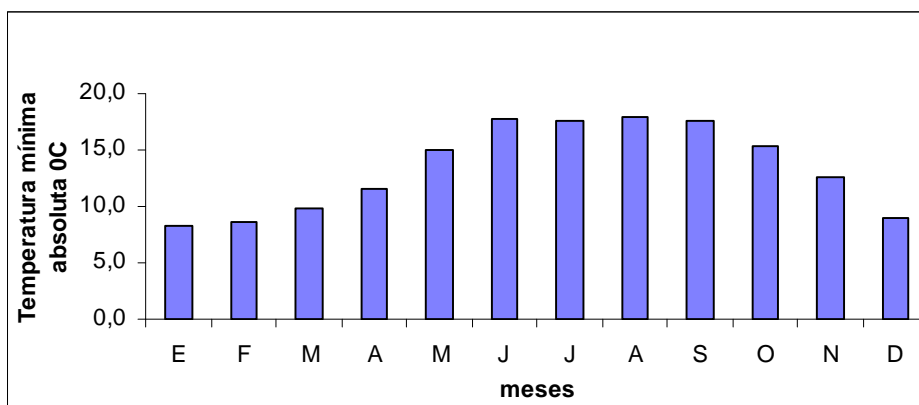


Figura 4.6 Temperaturas mínimas absolutas de cada uno de los meses en el periodo 1979- 2005.

Análisis de tendencias.

Temperatura mínima media

Prueba de rachas	
	Temperatura mínima media (°C)
Valor de prueba(a)	18,9
Casos < Valor de prueba	158
Casos >= Valor de prueba	166
Casos en total	324
Número de rachas	63
Z	-11,124
Sig. asintót. (bilateral)	,000

a Mediana

Según la prueba de las rachas, para un nivel de significación del 5%, no se puede asumir aleatoriedad en el comportamiento de este parámetro; sin embargo, al realizar el análisis de regresión contra el tiempo, la relación no es significativa, por tanto la pendiente del modelo tampoco lo es y se reafirma que no se puede asumir una tendencia en el comportamiento de este parámetro ya que el coeficiente de determinación (R^2) tiene un valor de solo 0.002.

Con la prueba de Mann-Kendall el estadístico S que se obtiene es de 51 y $Z = 1.105$ con una probabilidad de solo 0.865, lo que no pone de manifiesto la existencia de ninguna tendencia en la serie de datos analizada.

Temperatura mínima absoluta

Prueba de rachas

	Temperatura mínima absoluta (°C)
Valor de prueba(a)	12,9
Casos < Valor de prueba	180
Casos >= Valor de prueba	180
Casos en total	360
Número de rachas	87
Z	-9,922
Sig. asintót. (bilateral)	,000

a Mediana

De acuerdo a los resultados la secuencia de observaciones estudiada no es aleatoria, pero no aparece ninguna tendencia determinada. Tampoco con la aplicación del modelo lineal resulta posible observar una pendiente distinta de cero, y el valor del coeficiente de determinación es $R^2 = 0.000$, claramente no significativo.

La prueba de Mann-Kendall resulta en esta variable plenamente coincidente con lo anteriormente expuesto ya que el valor de S es solo de 33 a lo que corresponde una $Z = 0.706$ con una probabilidad de 0.759.

Así pues, en este caso al igual que para la temperatura mínima media se reafirma que no se puede asumir una tendencia en el comportamiento de este parámetro.

Si se realiza el test de Mann-Kendall para los datos por separado, de las épocas seca y lluviosa los resultados ponen de manifiesto que no existen tendencias, ni en la temperatura mínima media ($p = 0.638$) ni en la temperatura mínima absoluta ($p = 0.500$).

4.3.3. Temperaturas máxima media y máxima absoluta.

Las temperaturas máximas medias de los 27 años incluidos en esta investigación vienen representadas en el diagrama de barras de la figura 4-7 en el que se aprecia que los mayores valores corresponden a los años 1990 y 1994, mientras que los menores se dan en 1980 y en 1995. Para la Estación Amistad la temperatura máxima media de todo el período es de 29.5 °C, muy parecida a la isoterma para esa zona de 29 °C (González *et al.*, 1987).

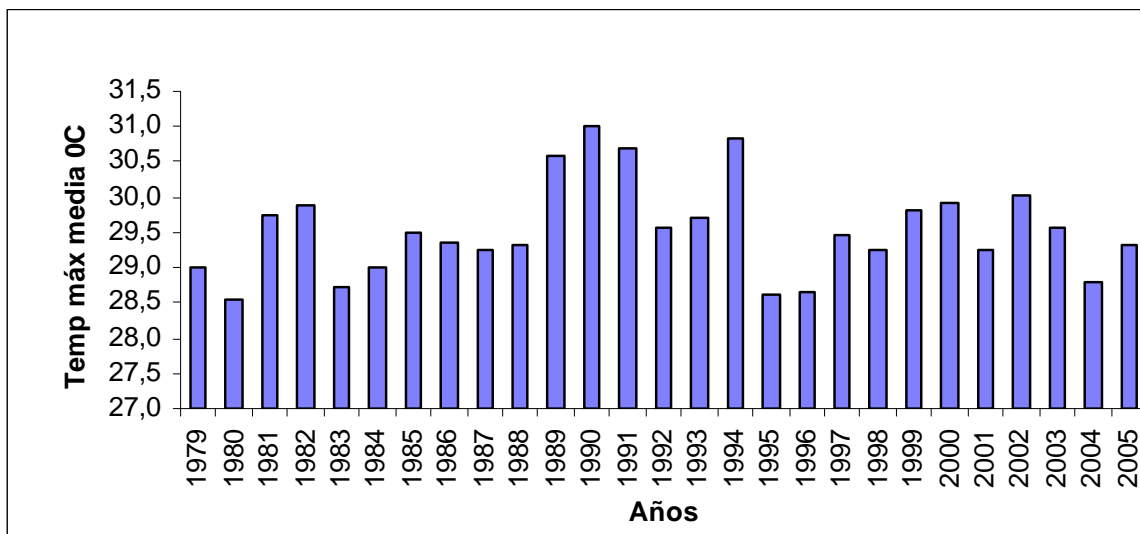


Figura 4-7. Temperaturas máximas medias a lo largo del período de estudio.

En la figura 4-8 se han representado los valores de las temperaturas máximas medias de los doce meses y se puede apreciar que agosto se presenta con la máxima de 31.9 °C, muy cercano a la isoterma señalada para esta zona en este mes que es de 32 °C.

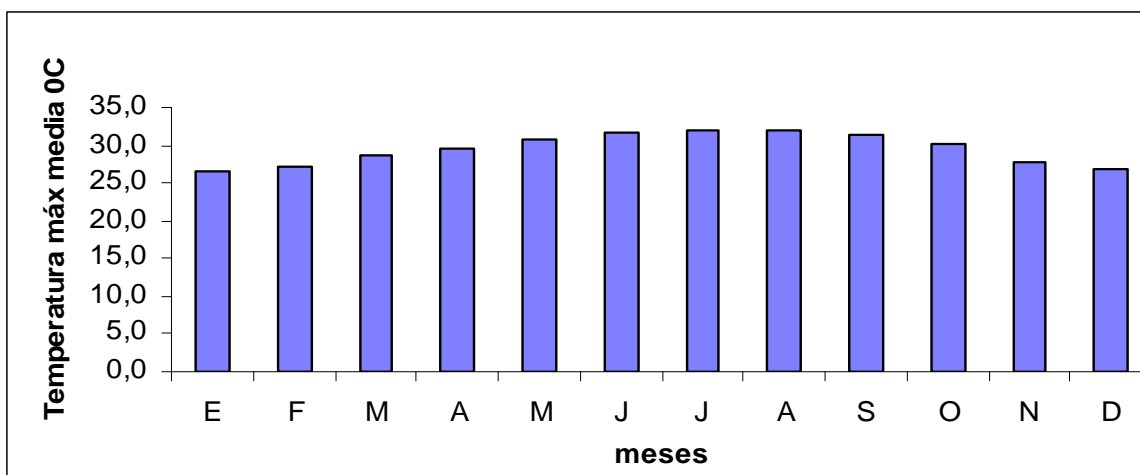


Figura 4-8. Temperatura máxima media por meses en el periodo 1979-2005.

Lo contrario ocurre en el caso del mes de enero que presenta la más baja de las máximas medias con 25.5 °C, con 0.5 °C por debajo de la isoterma del área de estudio.

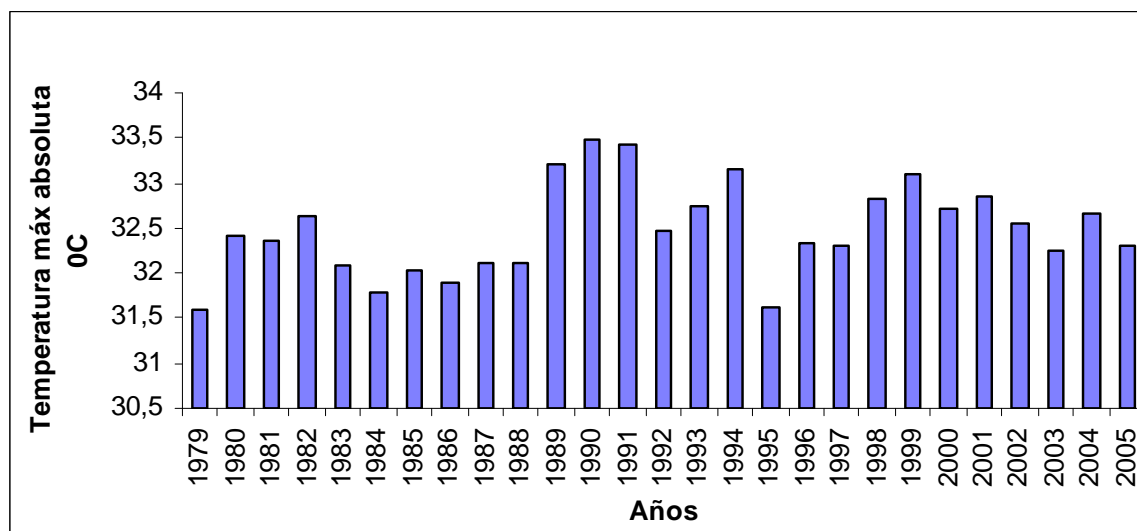


Figura 4-9. Temperatura máximas absolutas a lo largo del período de estudio.

Las temperaturas máximas absolutas de estos 27 años se representan en la figura 4-9 en la que se aprecian desde valores próximos a los 31,5 °C (1979 y 1995) hasta otros próximos a los 33,5°C (1990 y 1991).

En la distribución mensual de las temperaturas en el caso de la temperatura máxima media absoluta (Figura 4-10), los meses con mayores valores son de julio con 34,2 °C y agosto 34,1 °C. Como era de esperar, el mes con menor media de la máxima absoluta es enero con 31,1 °C.

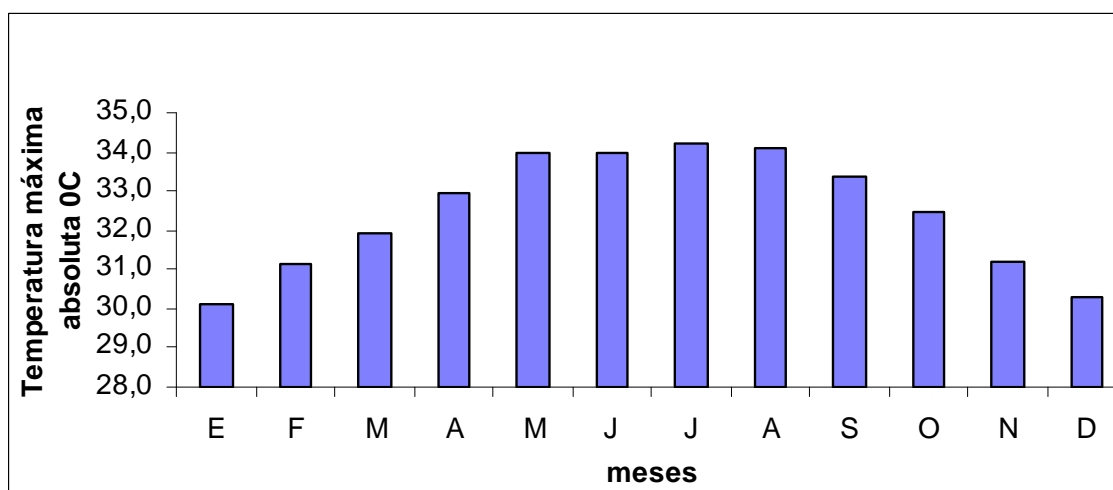


Figura 4-10. Valores mensuales de las temperaturas máximas absolutas.

Cuando en el evento de El Niño 1997 - 1998 en el país durante el periodo lluvioso de 1997 se presentaron temperaturas máximas muy notables y principalmente en el mes de agosto (34 °C) y septiembre (33 °C) (INSMET, s/f); en el caso de la Estación Amistad para estos meses los termómetros alcanzaron temperaturas de 34.5 °C en agosto y de 33.7 °C en septiembre.

Se puede concluir, al compararlas, que las temperaturas máximas medias y absolutas se corresponden con las isothermas registradas en el Atlas Climático de Cuba para el área de estudio.

Análisis de tendencias.

Temperatura máxima media

Prueba de rachas	
	Temperatura máxima media (°C)
Valor de prueba(a)	29,9
Casos < Valor de prueba	161
Casos >= Valor de prueba	163
Casos en total	324
Número de rachas	71
Z	-10,238
Sig. asintót. (bilateral)	,000

a Mediana

La secuencia de observaciones estudiadas no es aleatoria y como se observa en tabla no presenta ninguna tendencia significativa.

Tampoco el modelo de regresión lineal permite afirmar que exista un incremento de la temperatura máxima media ya que proporciona un coeficiente de determinación $R^2 = 0.006$, no significativo para los 25 grados de libertad.

De forma coincidente, el test de Mann-Kendall para los valores anuales no pone tampoco de manifiesto la existencia de tendencia alguna ya que se encuentra $S = 38$, $Z = 0.816$ y una probabilidad de solo 0.792.

Temperatura máxima absoluta

Prueba de rachas

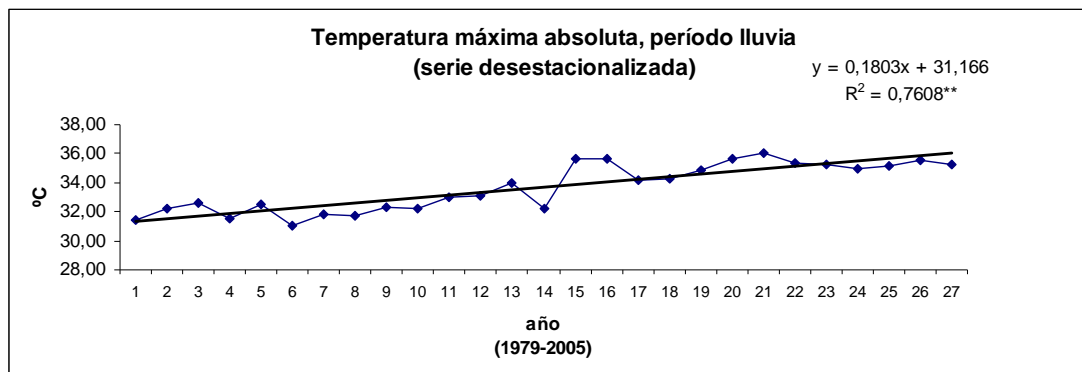
	Temp. máxima absoluta (°C)
Valor de prueba(a)	32,7
Casos < Valor de prueba	180
Casos >= Valor de prueba	180
Casos en total	360
Número de rachas	77
Z	-10,978
Sig. asintót. (bilateral)	,000

a Mediana

De acuerdo a los resultados, la secuencia de observaciones estudiada no es aleatoria. Aun cuando el resultado de la prueba de rachas indica que la secuencia no es aleatoria se observa una tendencia al incremento de la temperatura máxima absoluta en 0,021 °C, con una confiabilidad del 90%, Con el modelo de regresión lineal se obtiene un valor de $R^2 = 0.109$ ($p < 0.10$) próximo a la significación estadística. Tampoco la desestacionalización de la serie proporciona un ajuste significativo al modelo lineal ($R^2 = 0.015$).

La prueba de Mann-Kendall da resultados similares, no significativos aunque no muy alejados de la significación ($S = 73$, $Z = 1.589$ y $p = 0.944$).

Cuando se realiza por separado el análisis de tendencia de las temperaturas máximas absolutas en épocas seca y lluviosa, los resultados indican que mientras no existe significación en la primera de ellas, si que la hay, en la segunda. El test de Mann-Kendall para el período seco da valores de $S = 47$, $Z = 1.124$ y $p = 0.869$. Por el contrario, con los datos anuales de la época de las lluvias si se observa una tendencia creciente significativa con esta prueba ($S = 82$, $Z = 1.786$ y $p = 0.963$).



Al mismo resultado se llega con el modelo de regresión lineal que, para las temperaturas máximas absolutas del periodo de lluvia permite un muy buen ajuste para una tendencia creciente, con $R^2 = 0.761$ ($p < 0.001$).

4.3.4. Temperatura del agua del arroyo.

Además de las mediciones térmicas de la atmósfera realizadas en la cabina meteorológica de la estación, todos los días se tomaban también las temperaturas de los arroyos que drenan las subcuencas. Dadas las especiales características térmicas del agua, se considera de interés analizar si las temperaturas del arroyo que corresponde a la subcuenca testigo, muestra, en el período investigado, alguna tendencia que se corresponda con las hipótesis de calentamiento realizadas para Cuba (Centella *et al.* 2001).

Teniendo en cuenta la información primaria de la temperatura media del agua por meses del año (Tabla 8 del Anexo) durante los años 1979 hasta el 2005, se calcularon regresiones lineales entre el número de años y la temperatura media del agua en cada uno de los 12 meses de los años investigados. Los datos de los años analizados se expresan a continuación (Tabla 4.3; Figura 4.11).

Como se observa, en todos los meses secos del año (noviembre - abril) hay un aumento significativo de la temperatura del arroyo, mientras que en los otros meses no

Tabla 4.3. Regresiones lineales entre número de años y temperatura media del agua.

Mes	# de datos	a (ordenada en origen)	b (pendiente)	r (coeficiente correlación)	Nivel de significación
Enero	22	18.48	0.105	0.612	P<0.01
Febrero	21	18.64	0.112	0.594	P<0.01
Marzo	20	20.01	0.063	0.484	P<0.05
Abril	13	20.78	0.090	0.632	P<0.05
Mayo	22	23.15	- 0.005	- 0.005	Ns
Junio	23	23.48	- 0.004	- 0.070	Ns
Julio	23	24.46	- 0.036	- 0.406	Ns
Agosto	23	24.16	- 0.030	- 0.556	P<0.01
Septiembre	23	23.53	0.006	0.117	Ns
Octubre	23	23.01	0.014	0.215	Ns
Noviembre	23	21.03	0.076	0.623	p<0.01
Diciembre	23	19.58	0.077	0.489	P<0.05

se observa una tendencia temporal significativa más que en el mes de agosto y de signo contrario. Las pendientes de las rectas, grado de incremento por año, oscilan para los meses secos entre 0.06 y 0.11 °C y el descenso de las temperaturas en el mes de agosto es de sólo de 0.03 °C por año. Entre otros factores, el incremento de la temperatura media del agua del arroyo, está dado por la disminución significativa del caudal. Al buscar la tendencia del escurrimiento en estos se ve que:

- Para el caudal total no hay tendencia alguna ($r = - 0.070$, con 14 grados libertad).
- Para el caudal de los meses de lluvias tampoco hay tendencias ($r = - 0.128$, con 14 grados libertad).
- Para los meses de seca no llega a haber una tendencia significativa al descenso del escurrimiento, ya que el valor de r es $- 0.459$, con 14 grados de libertad siendo significativo, para $p < 0.05$, un valor de r de 0.497.

El aumento de la temperatura del arroyo en los meses de seca, se ve influido, entre otros factores por la tendencia al descenso de los valores del escurrimiento, que, si bien no es significativa estadísticamente, si está muy cerca de serlo. Los grados de incremento para meses secos oscilan entre 0.06 y 0.11 °C.

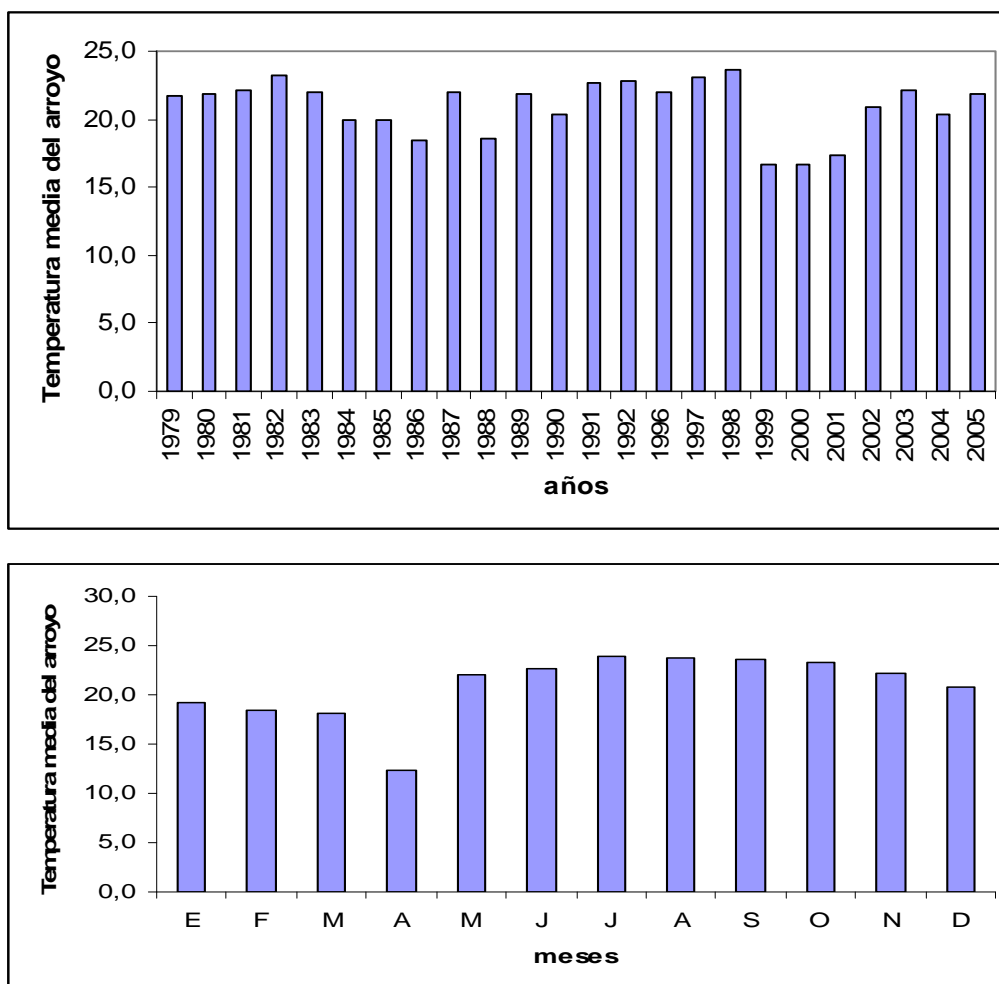


Figura 4.11. Temperatura media del arroyo por años y meses en el periodo 1979-2005.

4.4. Precipitación.

De acuerdo con la cantidad y el carácter de las precipitaciones en Cuba, se reconocen dos periodos o temporadas: la lluviosa, de mayo a octubre (80%), y la poco lluviosa, de noviembre a abril (20%) (Centella *et al.* 1997). Es de destacar tanto en los valores

mensuales como anuales que la variabilidad natural del Clima en Cuba se encuentra afectada por fenómenos de gran interés, uno de ellos es el impacto ENOS (El Niño Oscilación del Sur) y el otro son los ciclones (INSMET s/f). Según esta misma fuente el elemento que más varía en el clima de Cuba son las precipitaciones. Estos fenómenos se manifiestan en la Estación Amistad, como se observa en la figura 4.12, que muestra las precipitaciones del periodo 1979-2005, los años que sobrepasan los 2000 mm están por lo general marcados por algunos de estos fenómenos. Así en los años 1979, 1982, 1996 y 2001 han habido ciclones. Por otro lado como consecuencia del efecto de El Niño, en el periodo 1982-1983, se presentaron 26 ciclones extratropicales en el Golfo de México y la precipitación fue de 3 a 5 veces mayor que el acumulado histórico para periodo seco considerándose el invierno más húmedo en los últimos 50 años. En el caso específico de la Estación Amistad cayeron 305 mm, 259 mm y 176 mm en enero, febrero y marzo respectivamente en 1983. Posteriormente se presentó el evento 1994-1995 donde precipitaron 2816 mm para comportarse como el año más lluvioso en la Estación Amistad en el periodo de 27 años. Por otra parte El Niño 1997-1998 (catalogado como el evento más intenso del presente siglo), en este caso octubre de 1997 a nivel nacional solo cayó el 50 % de la media histórica y en caso de la Estación Amistad solo fue de 63 mm, un poco por debajo de la media, los meses de abril, mayo y junio se presentó una sequía significativa, llegando a caer en el mes de junio sólo 2 mm, siendo este mes uno de los más lluviosos (273 mm). En el periodo seco precipita en la Estación Amistad 483.4 mm (26.4 %), por encima de la Isoyeta representativa para esa zona (ICGC 1978). Respecto a la total anual en la Estación Amistad, 1827.6 mm, está entre la Isoyetas para esta zona (1600-2000 mm), y en el periodo húmedo cuya precipitación es 1344 mm en la Estación Amistad está entre las Isoyetas para esta región (1200-1400 mm). Como se puede apreciar la precipitación en la Estación Amistad se corresponde en términos generales con las Isoyetas registradas en el Atlas Nacional de Cuba, excepto en el periodo seco en que está algo por encima.

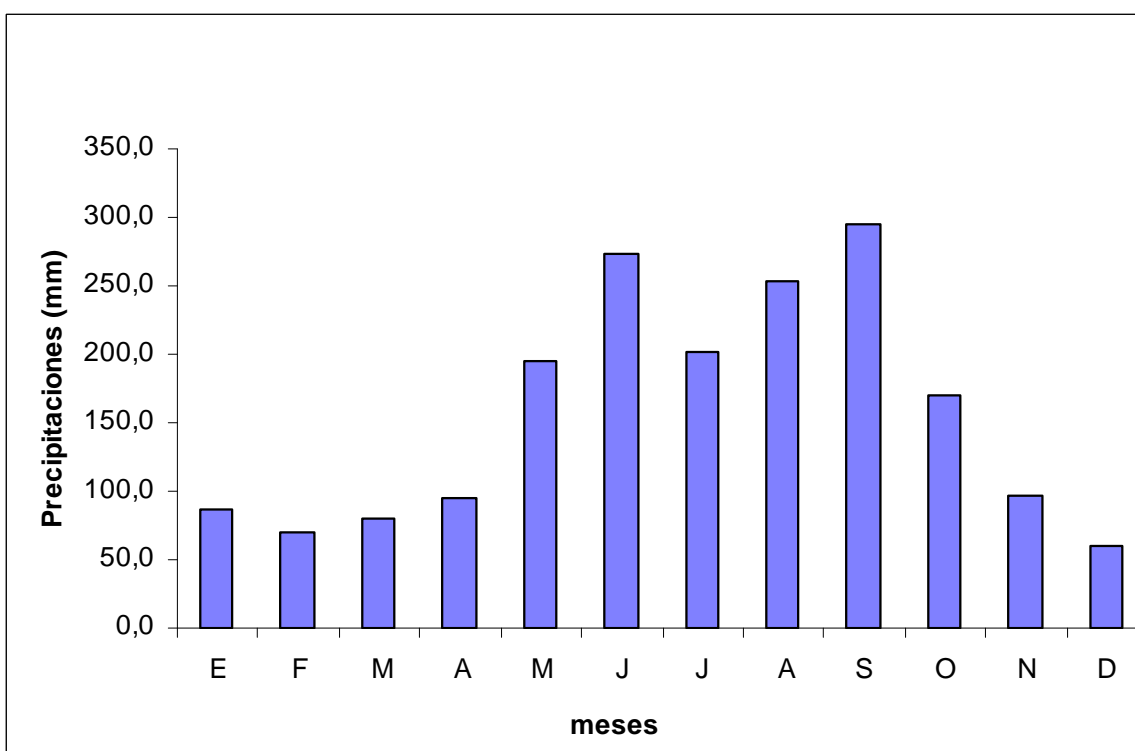
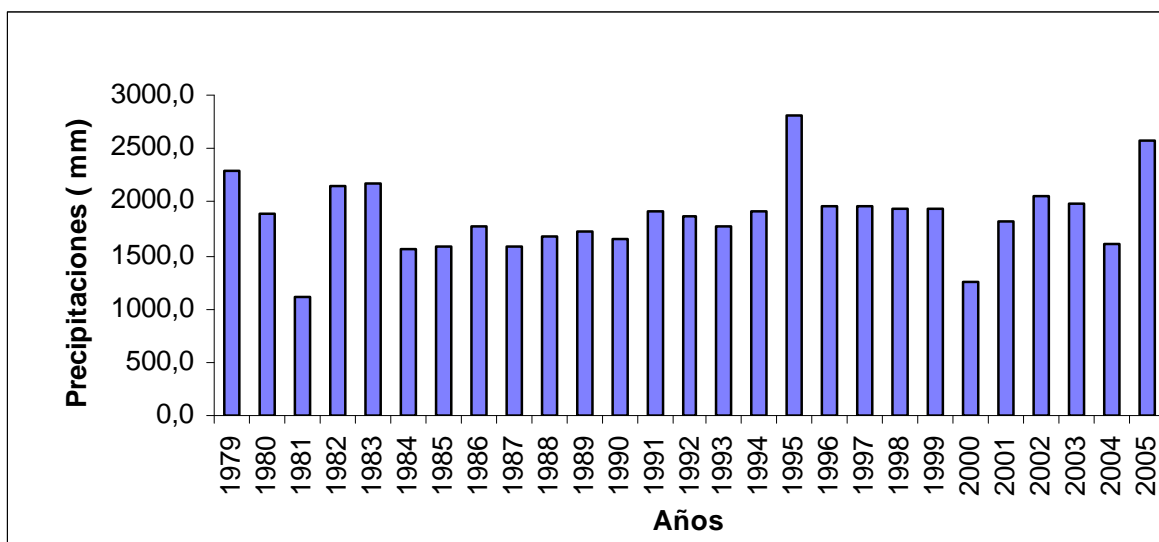


Figura 4.12. Volúmenes de precipitación por años y meses en el período 1979-2005.

Si estos 27 años se dividen en dos periodos, los primeros 14 años (1979 – 1992) y un segundo periodo de los últimos 13 años (1993 – 2005), se observa que en el segundo periodo hay un incremento en las precipitaciones de 142.7 mm para un incremento total del 7.2 % (Tabla 4.4)

Ahora bien, en la Estación Hidrológica Forestal Amistad, al analizar por período húmedo y seco se observa que hay una tendencia a que el periodo húmedo tienda a ser más húmedo (incremento 204.56 mm para un 13 %), mientras que los periodos secos tienden a presentarse más secos (disminución de 61.86 mm, para un 12.05 %).

Tabla 4.4. Comportamiento de las precipitaciones, periodo húmedo y seco, en dos intervalos de tiempo (1979 -1992) y (1993 – 2005). Estación Hidrológica Forestal Amistad.

	1979 – 1992	1993 – 2005	Diferencia	
			mm	%
Total	1833.4 mm	1976.1 mm	142.7	7.2
P. Húmedo	1319.84 mm	1524.4 mm	+204.6	+13.4
P. Seco	513.56 mm	451.7 mm	- 61.9	- 12.0

Comparación con otras cuencas de la provincia.

Los valores de precipitación anual de la estación de Amistad, y los estimados para las partes superiores de las cuencas de los ríos Mantua, Cuyaguateje y San Juan y Martínez, durante el período de los años hidrológicos comprendido entre 1979 y 2002, es bastante similar en el caso de Amistad, Mantua y Cuyaguateje y alrededor de 200 mm inferior en el caso de San Juan y Martínez (Figura 4.13). Un segundo aspecto a destacar es la muy desigual distribución de los volúmenes de precipitación entre las épocas lluviosa y seca, cuyos valores oscilan, aproximadamente, entre una cuarta (Amistad) y una quinta parte (San Juan y Martínez) del valor total de año, lo que representa que entre el 80 % y el 75 % del agua que reciben cada año estas estaciones corresponde a la época lluviosa, una situación similar a la descrita por Iroume (2005) en cuatro microcuencas de Chile, si bien en esta ocasión se trata de lluvia invernal. Si se tiene en cuenta que la capacidad evaporativa en estas áreas es de alrededor de un 55 % para la época húmeda y de un 45 % para la seca resulta fácil comprender que un bosque que recibe solo entre el 20% y el 25 % de los recursos hídricos en esos seis

meses secos, pero se enfrenta a una demanda de evapotranspiración de poco menos de la mitad de la del año, no tenga una disponibilidad absoluta para transpirar, sino que se vea sometido a fases más o menos prolongadas de estrés hídrico.

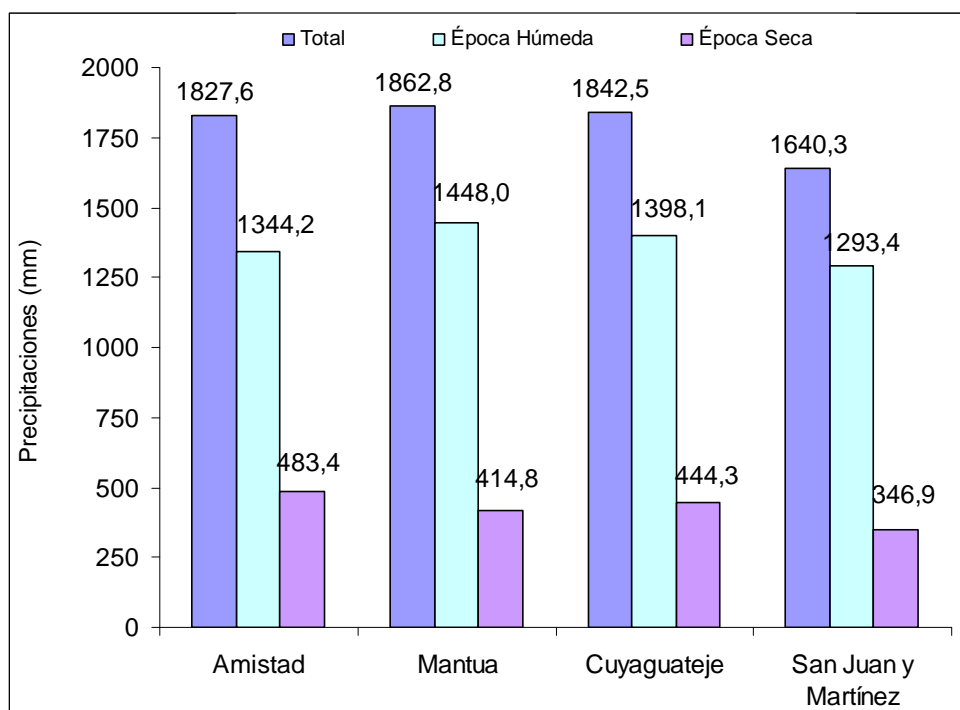


Figura 4.13. Valores de precipitaciones (mm) totales y por épocas de las áreas de estudio, para el período hidrológico de 1979 al 2002.

Los años hidrológicos más lluviosos de la serie estudiada son 1982-83 y 1995-96, tanto en precipitación total como en la correspondiente a la época húmeda. En el primero de ellos es patente el efecto del ciclón Alberto que afectó toda esta parte del occidente de Cuba en el mes de junio de 1982. Por el contrario las fases de mayor sequía corresponden a los seis meses secos de los años hidrológicos 1987-88 y 2000-01 en los que la precipitación fue inferior a los 300 mm, lo que representa un promedio de menos de 50 mm en cada uno de los meses afectados.

Si se comparan los resultados de la figura con el mapa isoyético que aparece en Ibarra (1978), se puede apreciar que las áreas de estudio se localizan mayormente en las isolíneas de 1600 y 1800 mm año⁻¹, lo cual se puede considerar bastante coincidente, con las estimaciones aquí realizadas.

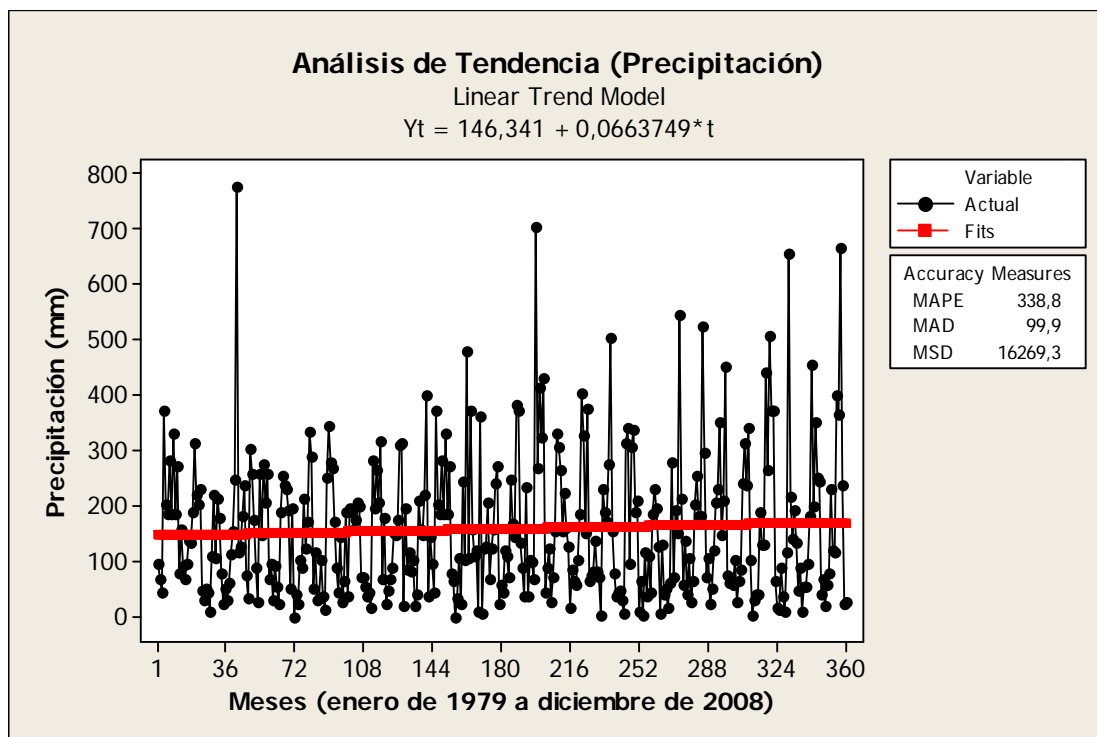
Análisis de tendencia.

a) Con los datos de todos los meses desde 1979 al 2008

Prueba de rachas

	Precipitación (mm)
Valor de prueba(a)	126,3
Casos < Valor de prueba	180
Casos >= Valor de prueba	180
Casos en total	360
Número de rachas	105
Z	-8,022
Sig. asintót. (bilateral)	,000

a Mediana



A partir de estos resultados se puede rechazar la hipótesis de independencia y concluir que la secuencia de observaciones estudiada no es aleatoria.

Como se observa hay fundamentalmente cuatro datos atípicos, los cuales coinciden con la ocurrencia de ciclones o el fenómeno del ENOS, en general se aprecia una ligera tendencia al incremento, si se evalúa el modelo matemático que representa la línea de tendencia se obtiene 146,4 mm para el primer mes y 170,2 mm para el mes 360, lo que da una diferencia de 23,8 mm esto se corrobora si se tiene en cuenta que de los 30 años analizados 15 están por encima de la media global (50 %), pero 11 de esos 15 valores ocurren en los últimos 15 años (73,3 %).

Posteriormente se realizó el análisis de estacionalidad, para ello se calculan las medias de las filas y las de las columnas. Las medias de las filas representan el promedio de precipitación mensual durante los años analizados (1979 – 2008), mientras que las medias de las columnas son el promedio de precipitación en el año. Se calcula la media total de los datos y se resta esta media global de la media de cada mes, obteniéndose 12 coeficientes que suman cero y que representan cómo se sitúa la media de cada mes con relación a la media global, a estos valores se le llama coeficientes estacionales.

Tabla 4.5. Coeficientes de estacionalidad (precipitación, periodo 1979 – 2008)

Meses	MEDIA	Coeficiente de Estacionalidad
Enero	78,90	-78,60
Febrero	70,23	-87,27
Marzo	76,93	-80,57
Abril	97,39	-60,10
Mayo	188,89	31,39
Junio	286,86	129,36
Julio	208,03	50,53
Agosto	257,35	99,85
Septiembre	302,54	145,04
Octubre	173,06	15,56
Noviembre	90,23	-67,26
Diciembre	59,55	-97,94
Media Global	157,50	0,00

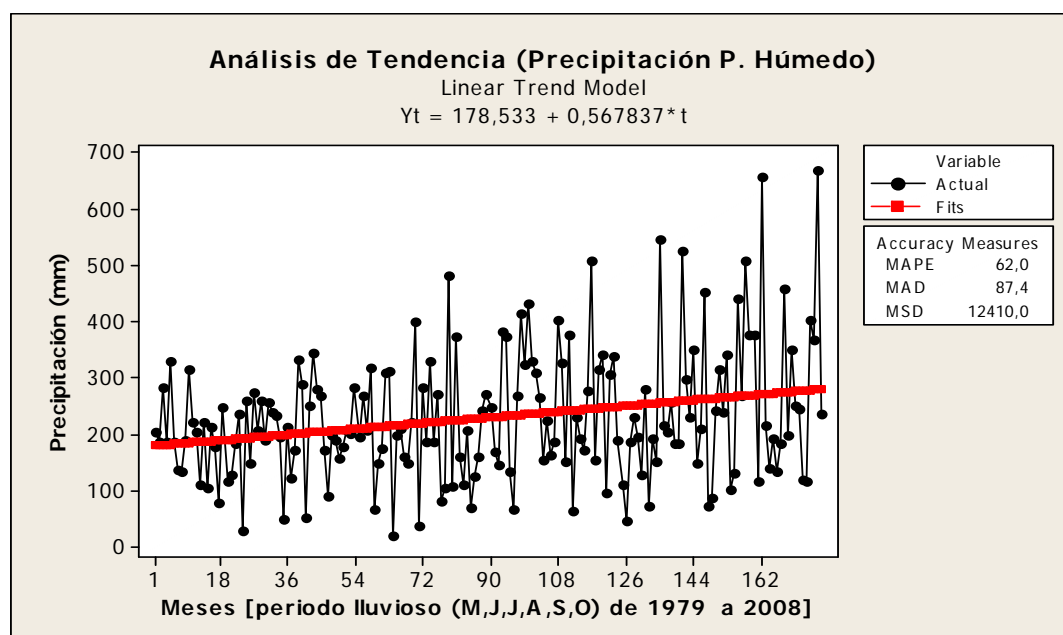
En la tabla 4.5 se observa que los meses correspondientes al periodo seco son más bajos destacándose por este orden diciembre, febrero y marzo, mientras que en el período húmedo se presentan los valores más elevados destacándose septiembre, junio y también agosto. A la vista de estos resultados, se decidió analizar como series independientes la precipitación para el periodo seco y húmedo.

Tabla 4.6. Análisis de regresión lineal por años general y para el período húmedo y seco (precipitación, 1979-2005)

	n	Constante	Pendiente	r^2	Significación
General	27	-1483,5	8,061	0,033	0,367
Periodo Húmedo	27	-30442,8	15,979	0,176	0,03*
Periodo Seco	27	16259,385	-7,918	0,127	0,068

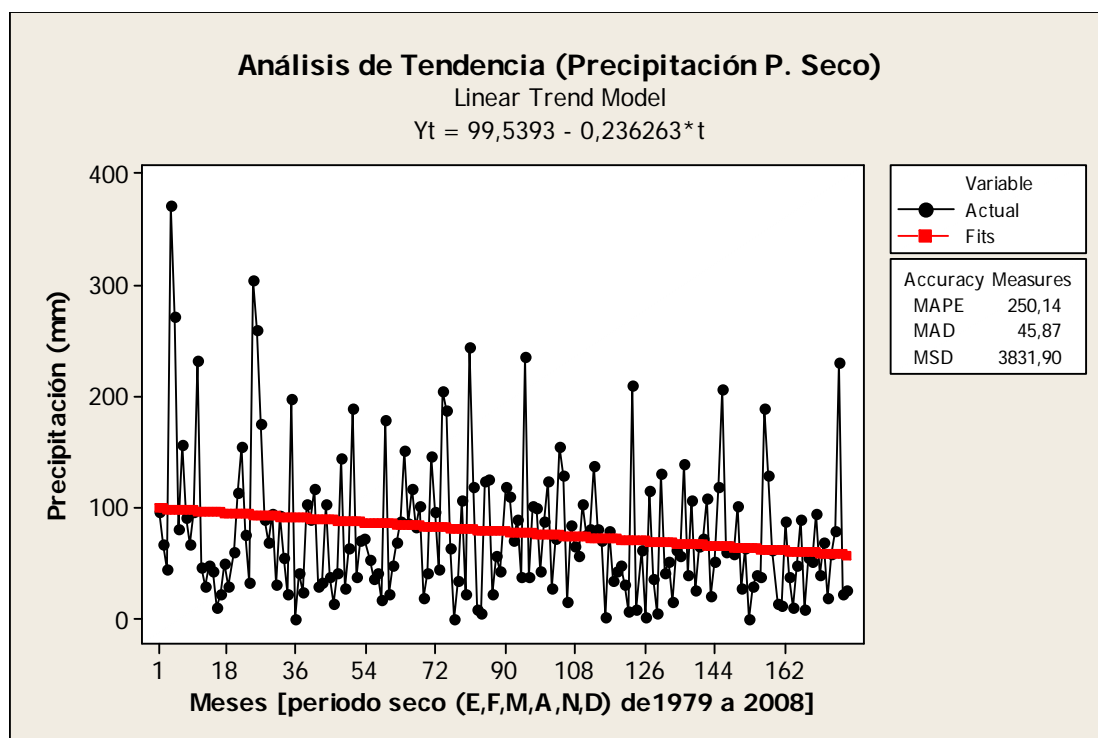
Del análisis de la tabla 17 se infiere una tendencia al incremento de las precipitaciones en 15,98 mm, durante el período húmedo, con un nivel de significación del 5% y una tendencia a la disminución en 7,92 mm durante el período seco, pero ara un nivel de significación del 10%.

b) Con los datos del periodo húmedo desde 1979 al 2008



En esta gráfica se observa que la tendencia al incremento es más marcada, aquí al evaluar el modelo la línea inicia en 179,1 mm y concluye en 270,4 (91,4 de diferencia)

d) Con los datos del periodo seco desde 1979 al 2008



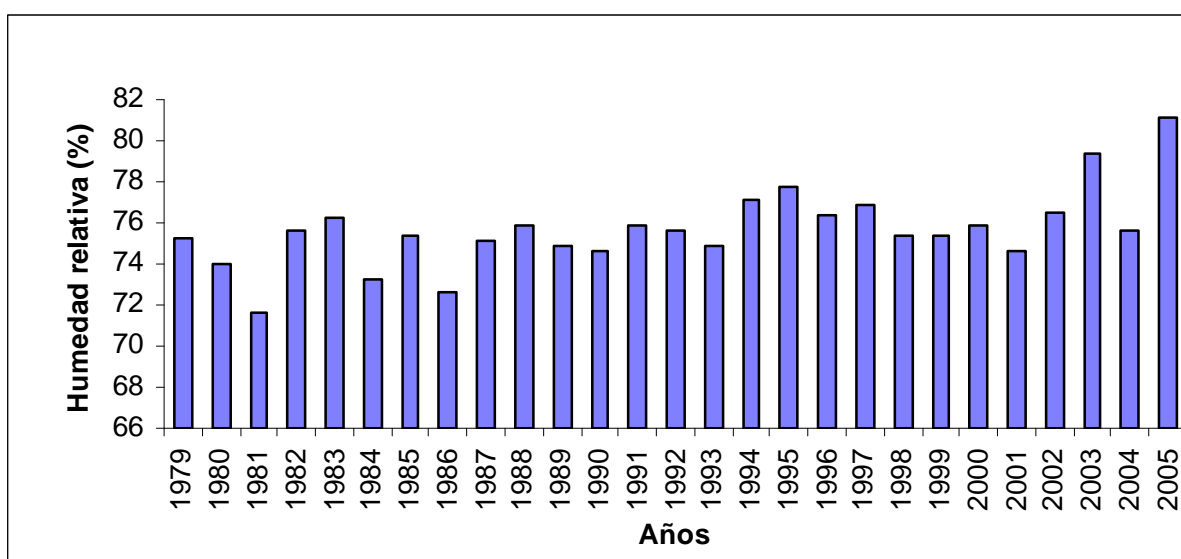
Para el periodo seco ocurre algo similar pero en sentido inverso, es decir, un decrecimiento, la línea inicia en 99,3 mm y finaliza en 61,3 mm (38 mm de diferencia).

La aplicación del test de Mann Kendall coincide plenamente con los resultados vistos hasta ahora ya que, para el conjunto de volúmenes de precipitación anual no se observa tendencia alguna, pero cuando se analizan por separado las lluvias de las épocas seca y lluviosa, mientras que para las primeras el valor de Z es de solo 1.07 ($p = 0.85$) para el período húmedo Z vale 2.39 ($p = 0.991$) lo que muestra una tendencia creciente significativa.

4.5. Humedad relativa

En Cuba, como en otros muchos países tropicales, los valores de la humedad relativa del aire siguen un patrón de variación anual que se corresponde con la distribución estacional de las lluvias, cuyo máximo tiene lugar en octubre. En el caso concreto de la Estación Amistad, los valores medios anuales de humedad relativa del período de estudio aparecen en la figura 4.14 en la que destacan como los valores más bajos los correspondientes a los años 1881, 1986 y 1984, mientras que por el contrario los valores más elevados de esta variable se dan en los años 2005 y 2003. En lo referente a la distribución de los valores mensuales se cumple el modelo expuesto para todo el país, salvo en el detalle de que el valor máximo ocurre en septiembre con 79.7%, en vez de octubre (Figura 4.14), lo que está en correspondencia con que este mes es el que recolecta mayor cantidad de precipitación, 295 mm, y además aquel con un mayor número de días de lluvia, 19 días.

Por el contrario en el periodo poco lluvioso es abril el mes que menor valor medio de humedad relativa presenta en Cuba lo que coincide con lo que ocurre en la Estación Amistad en la cual se da el valor más bajo del año, de solo el 69.6 %.



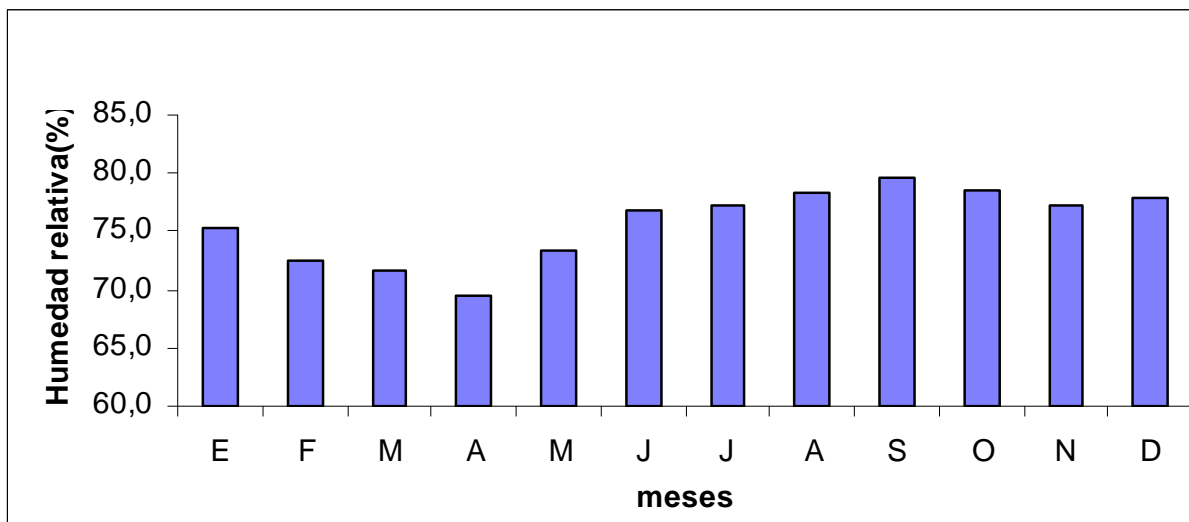


Figura 4.14. Humedad relativa (%), por años y meses en el periodo 1979-2005.

Análisis de tendencia

El análisis estadístico se hizo con los datos de todos los meses desde 1979 al 2008 y según los resultados la secuencia de observaciones estudiada no es aleatoria.

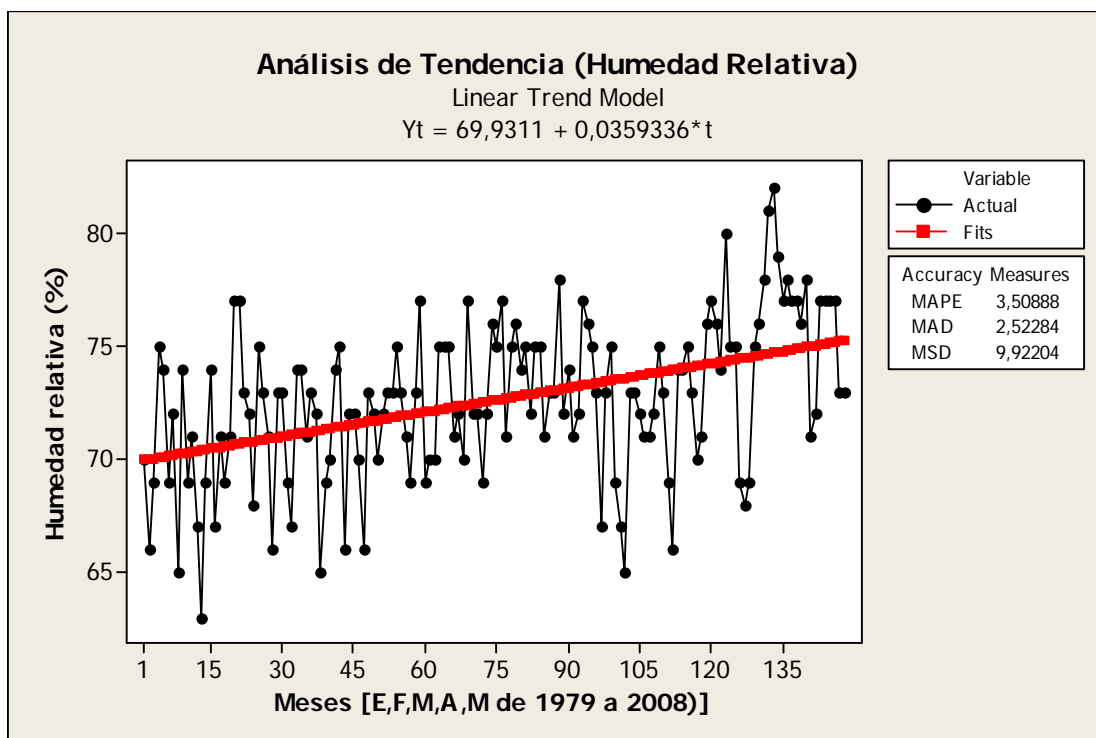
Prueba de rachas	
	Humedad relativa (%)
Valor de prueba(a)	76
Casos < Valor de prueba	160
Casos >= Valor de prueba	200
Casos en total	360
Número de rachas	79
Z	-10,664
Sig. asintót. (bilateral)	,000

a Mediana

Como se observa en la tabla 4.7 la tendencia de esta variable es al aumento, evaluando el modelo se constata que el valor inicial es de 73,68 % y el final es de 77,54 %.

Para esta variable también se realizó el análisis de estacionalidad y se decidió procesar las series teniendo en cuenta los resultados obtenidos (Tabla 4.7)

b) Con los datos lo meses de enero a mayo desde 1979 al 2008



c) Con los datos lo meses de junio a diciembre, desde 1979 al 2008

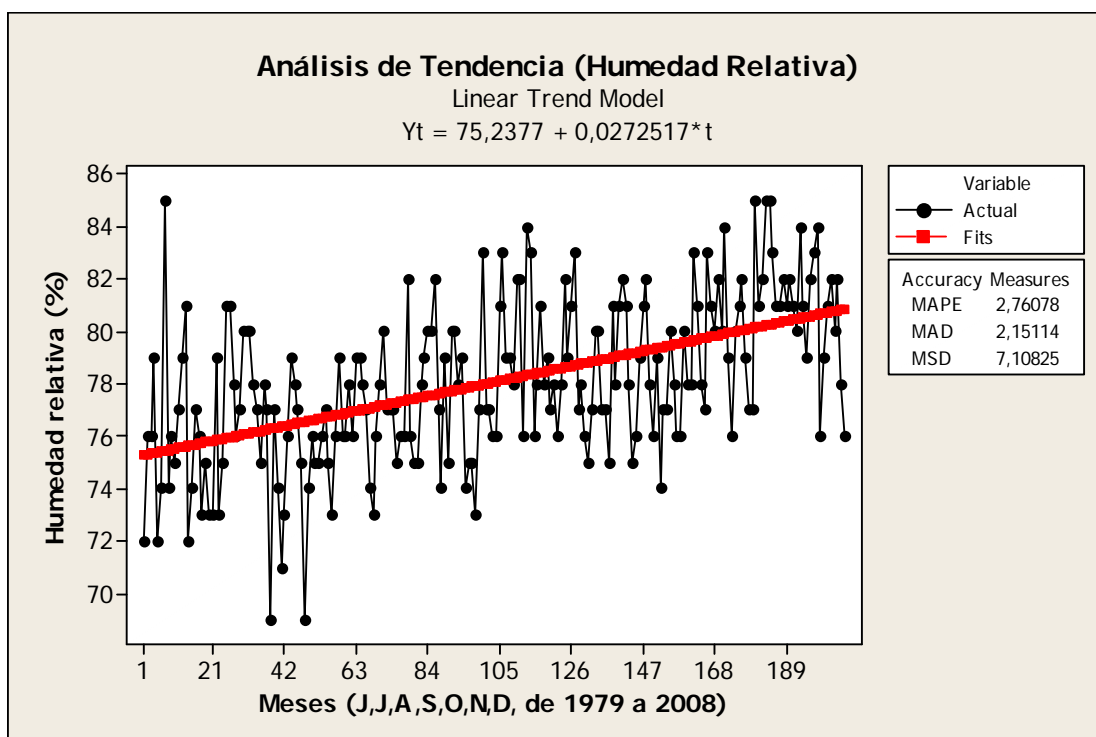


Tabla 4.7. Regresiones lineales entre número de años y humedad relativa.

Período	# de datos	a (ordenada en origen)	b (pendiente)	r (coeficiente correlación)	Nivel de significación
1979-2005	27	73,68	0,143	0.61	P<0.001

Tabla 4.8. Coeficientes de estacionalidad (Humedad relativa, 1979 – 2008)

Meses	MEDIA	Coeficientes de estacionalidad
Enero	75,37	-0,30
Febrero	72,59	-3,08
Marzo	71,56	-4,12
Abril	69,56	-6,12
Mayo	73,33	-2,34
Junio	76,89	1,22
Julio	77,15	1,48
Agosto	78,26	2,59
Septiembre	79,70	4,03
Octubre	78,59	2,92
Noviembre	77,22	1,55
Diciembre	77,85	2,18
Media Global	75,67	0,00

Los coeficientes de estacionalidad que aparecen en la tabla 4.8 muestran valores positivos para todos los meses de la época húmeda, con la excepción de mayo, y negativos en cuatro de los meses del período seco.

Si se analizan las regresiones de la evolución de la humedad relativa respecto al tiempo, en cada uno de los doce meses del año del período estudiado, se aprecia una falta de significación para tres meses de la época menos lluviosa y, por el contrario los mayores niveles de significación corresponden a meses de la época húmeda como junio, julio, agosto y septiembre.

Tabla 4.9. Regresión lineal Año vs Humedad relativa (%), periodo 1979 a 2005

Mes	n	Constante	Pendiente	r^2	Significación
Diciembre	27	245,676	-0,084	0,019	0,496
Enero	27	215,224	-0,07	0,016	0,532
Marzo	27	-200,855	0,137	0,129	0,065
Noviembre	27	-197,62	0,138	0,194	0,021*
Mayo	27	-251,37	0,163	0,155	0,042*
Febrero	27	-266,704	0,17	0,252	0,008*
Agosto	27	-273,199	0,173	0,337	0,001**
Octubre	27	-266,785	0,173	0,234	0,011*
Julio	27	-286,471	0,183	0,397	0,000**
Abril	27	-314,737	0,193	0,157	0,041*
Septiembre	27	-457,82	0,27	0,378	0,001**
Junio	27	-478,877	0,279	0,342	0,001**

Cuando se aplica el modelo de regresión lineal, por separado, a las épocas seca y lluviosa, y cuando previamente se desestacionalizan los datos, se puede ver que en las dos estaciones se puede apreciar un incremento de la humedad relativa, pero el ajuste es mucho mejor para la época más húmeda que para la más seca (Figuras 4.15 y 4.16)

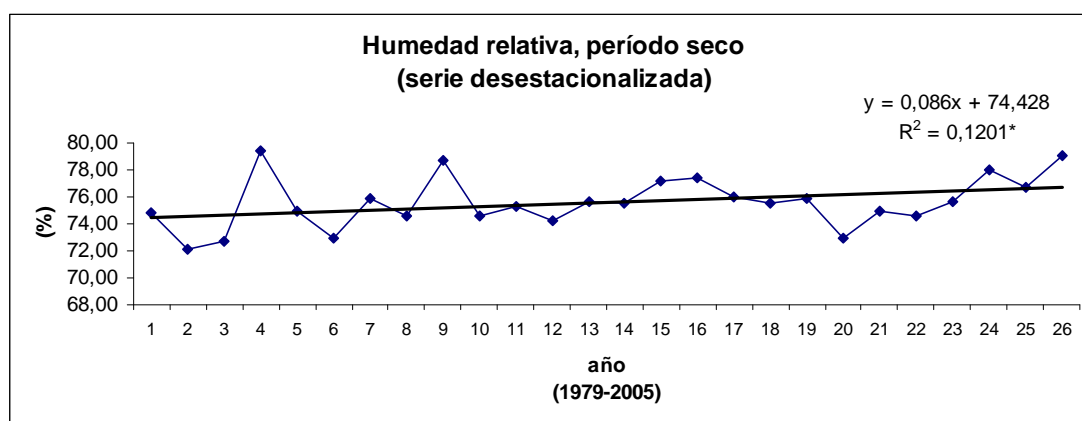


Figura 4.15. Tendencia de la humedad relativa con datos desestacionalizados en la época seca.

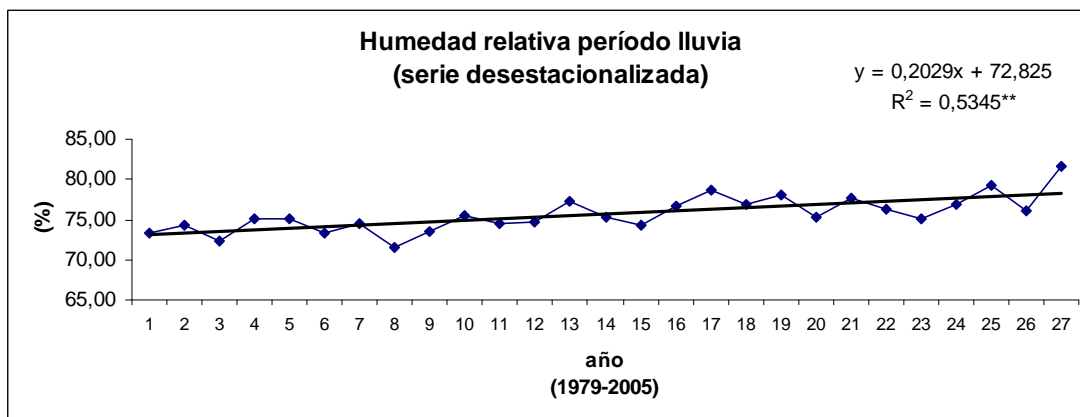


Figura 4.16. Tendencia de la humedad relativa con datos desestacionalizados en la época lluviosa.

Los resultados obtenidos por medio del test de Mann Kendall coinciden plenamente con los encontrados con la aplicación de los modelos de regresión lineal. Tanto los datos anuales como los separados por estaciones de seca y lluvia, muestran una interesante tendencia creciente. Para los primeros se obtiene un valor de $Z = 2.98$ al que corresponde un valor de $p = 0.998$. En la época de menor pluviosidad se encuentra una $Z = 2.22$ con una $p = 0.986$, y en la de mayores volúmenes de lluvia se obtiene un alto valor de $Z = 4.21$ que tiene una $p = 0.999$.

4.6. Evaporación.

Por su latitud, Cuba esta situada en la zona de mayor poder evaporativo de la atmósfera terrestre. La evaporación media anual para el territorio cubano es de 1995 mm, los valores más elevados se observan en el valle de río Cauto 2300 mm. Las áreas de menor evaporación anual se encuentran en las regiones montañosas del país, por ejemplo en la zona de la Gran Piedra la media anual es inferior a los 1100 mm. Los meses de mayor evaporación son marzo, abril y mayo. El mínimo absoluto anual de evaporación se ubica en los meses de noviembre, diciembre y enero. (INSMET, s/f).

En el caso de la Estación Amistad la evaporación media anual es de 1585 mm por debajo de la media anual del país y por encima de la zona de la Gran Piedra. Los

valores mensuales medios de los diferentes años del período estudiado vienen en la figura 4.17 en la que se aprecian años con valores alrededor de los 140 mm mensuales (1981, 1983 por ejemplo) hasta otros poco por encima de los 120 mm, como ocurre en 1995. En su distribución mensual, los mayores valores de esta variable climática coinciden con los meses de abril y mayo, con 162.3 mm y 164.8 mm respectivamente, seguidos por agosto (146.4 mm). Los valores mínimos de evaporación se producen durante los meses de noviembre a enero (Figura 4.17)

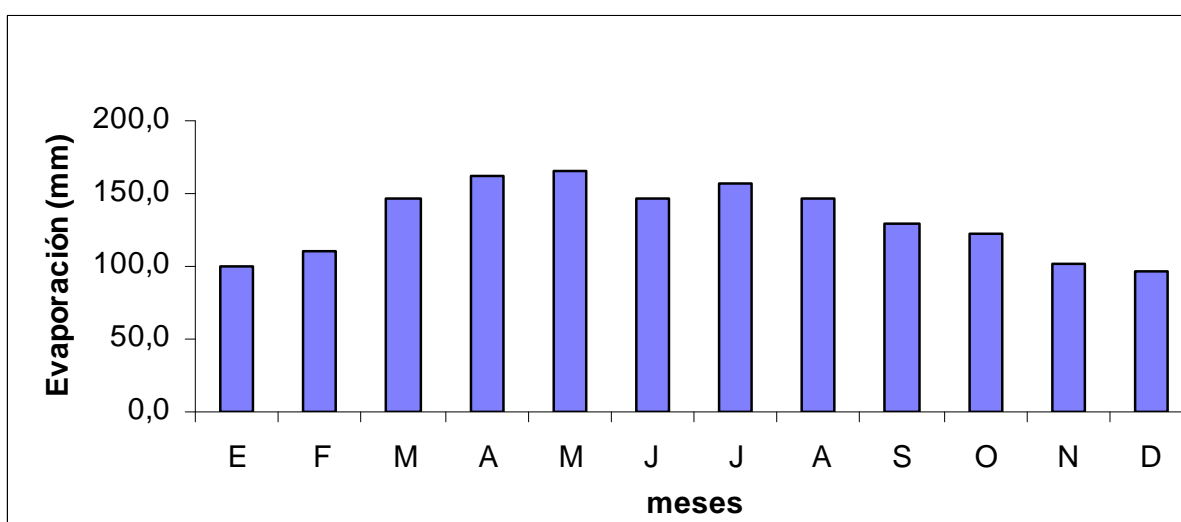
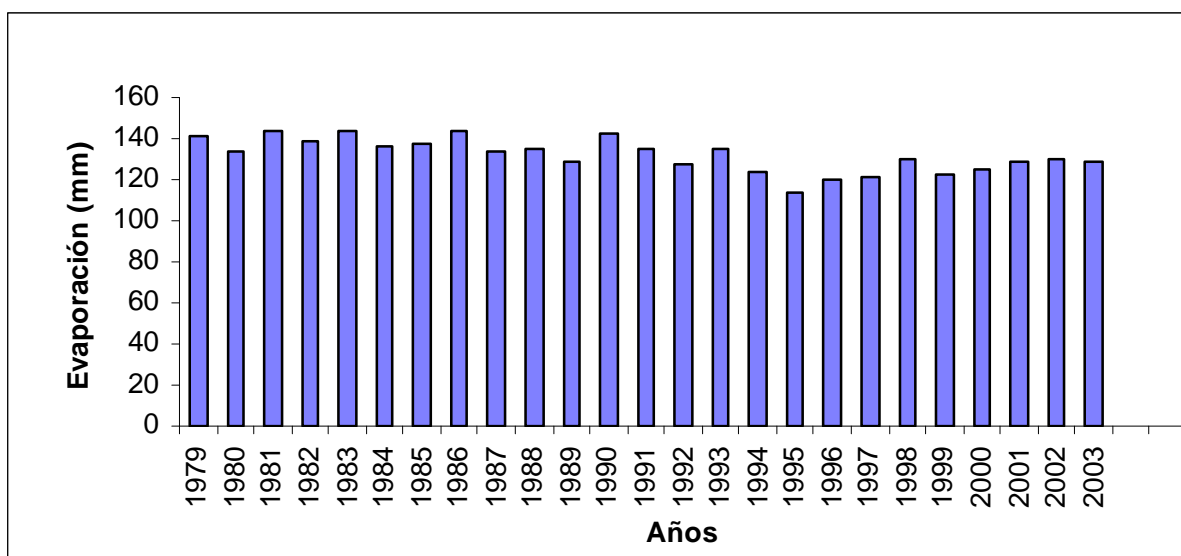


Figura 4.17. Evaporación (mm) por años y meses en el periodo 1979-2003.

Análisis de tendencia

Prueba de rachas

	Evaporación (mm)
Valor de prueba(a)	132,1
Casos < Valor de prueba	150
Casos >= Valor de prueba	150
Casos en total	300
Número de rachas	83
Z	-7,865
Sig. asintót. (bilateral)	,000

a Mediana

Según los resultados la secuencia de observaciones estudiada no es aleatoria. En el análisis del ajuste al modelo lineal se observa una tendencia a la disminución de este parámetro en 0.775 mm, para un 99% de confiabilidad, según el modelo de regresión ajustado (Tabla 4.10).

Tabla 4.10. Regresiones lineales entre número de años y evaporación.

Período	# de datos	a (ordenada en origen)	b (pendiente)	r (coeficiente correlación)	Nivel de significación
1979-2005	25	142	-0,775	0.693	P<0.01

Cuando se aplica este mismo modelo a las series desestacionalizadas, tanto de los datos anuales como de los que corresponden a las épocas de lluvia y de seca, se obtienen resultados muy similares a los que se dan para la humedad relativa, pero en esta ocasión con la tendencia a decrecer. Para el caso de los valores anuales se obtiene un valor de R^2 de 0.402 ($p < 0.001$), pero con la información del período seco el coeficiente de determinación es de solo 0.331 ($p < 0.03$) mientras que en el caso de la estación lluviosa el R^2 alcanza el valor de 0.477 ($p < 0.001$) (Figuras 4.18 y 4.19).

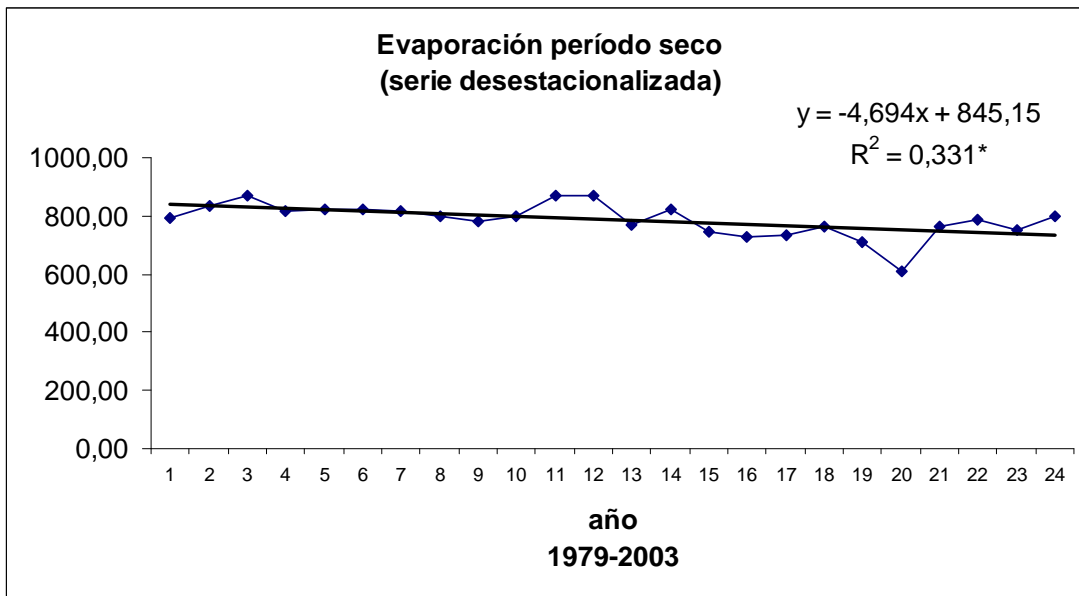


Figura 4.18. Tendencia de la evaporación con datos desestacionalizados en la época seca.

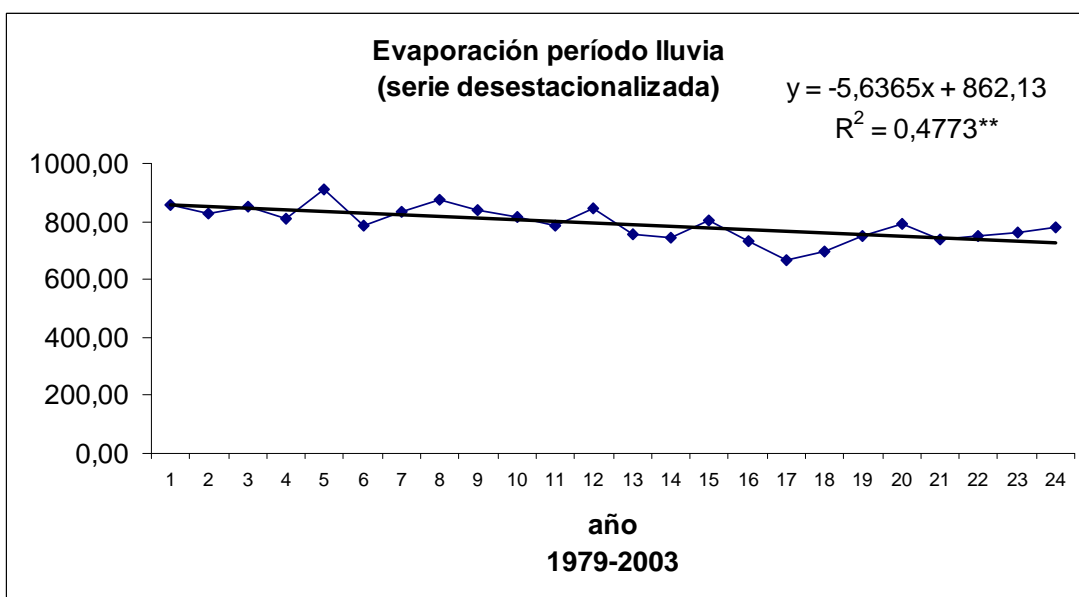


Figura 4.19. Tendencia de la evaporación con datos desestacionalizados en la época lluviosa.

Resultados muy similares a los presentados se obtienen al aplicar la prueba de Mann Kendall ya que, tanto para los datos de todo el año, como para los correspondientes a

las épocas seca y lluviosa, se observa una tendencia decreciente a lo largo del período con probabilidades de significación de 0.999 en todos los casos y valores de Z siempre superiores a 3.

4.7. Horas sol.

La insolación teórica en Cuba no experimenta grandes variaciones en el transcurso del año, sin embargo, la insolación real experimentó importantes variaciones a lo largo del

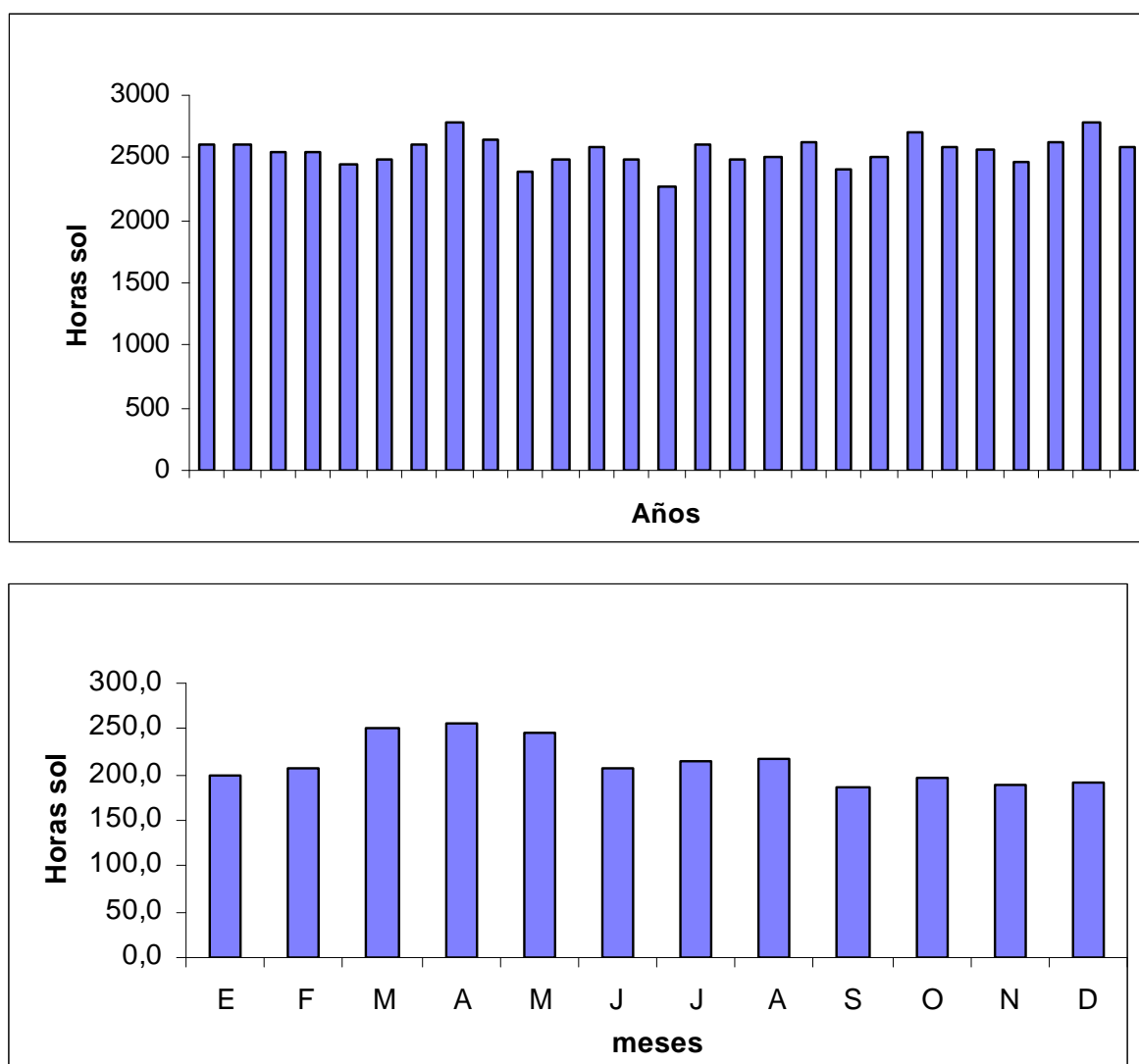


Figura 4.20. Horas sol por años y meses en el periodo 1979-2005.

territorio nacional y en los diferentes meses del año. La magnitud de la insolación real disminuye a medida que nos alejamos de las costas, alcanzando el mínimo en las regiones interiores del país. Abril presenta el máximo de la marcha de la insolación (281 a 300 horas) (INSMET, s/f). En el caso de la Estación Amistad también le corresponde a abril (Figura 4.20) con una media de 257 horas para el periodo 1979-2005, con un promedio diario de 8.5 horas coincidiendo con la Isohelía representada en el Atlas Nacional de Cuba. En las zonas costeras es donde se registran las máximas con 2900 horas de sol al año; en el caso de Amistad es del orden de 2543 horas de sol anuales.

Análisis de tendencia

Prueba de rachas	
	Horas de Sol
Valor de prueba(a)	214,5
Casos < Valor de prueba	180
Casos >= Valor de prueba	180
Casos en total	360
Número de rachas	128
Z	-5,594
Sig. asintót. (bilateral)	,000

a Mediana

Según los resultados de la prueba de rachas, la secuencia de observaciones estudiada no es aleatoria.

Tabla 4.11. Regresiones lineales entre número de años y horas sol.

Período	# de datos	a (ordenada en origen)	b (pendiente)	r (coeficiente correlación)	Nivel de significación
1979-2005	27	211,63	0,127	0.12	NS

Los resultados del análisis del ajuste al modelo lineal vienen en la tabla 4.11 en la que se puede observar que la regresión no es significativa, y por lo tanto no se puede asumir que exista una tendencia al incremento o decremento en las horas sol.

La aplicación del test de Mann Kendall a los datos de horas de sol diarias, tanto del conjunto del año como de las épocas seca y húmeda dan valores de Z no significativos estadísticamente (0.39, 0.88 y 0.39, respectivamente).

4.8. Medida del rocío.

Después de generalizar los datos bibliográficos existentes Rajmanov (1960) llegó a la conclusión de que en los países montañosos litorales, la humedad de condensación puede llegar a significar del 20-25 % de la suma anual de las precipitaciones y en condiciones muy favorables hasta la mitad de ésta. En condiciones climáticas más secas, la humedad de condensación constituye aproximadamente el 10 %.

Korpenko, (1972) (Citado por Molina 1981) señala, que en la parte europea de la URSS diariamente precipita en promedio 0.1 mm, teniendo en cuenta el número medio de días con rocío la cantidad de éste para la ciudad de Kazan constituye 7.1 mm al año y para Ishevsk 5.9 mm.

A falta de datos bibliográficos sobre la determinación del rocío en las condiciones de Cuba, se aportan aquí las observaciones realizadas en la Amistad durante tres años que aparecen en la tabla 4.12. Conviene recordar que las medidas de esta variable se realizaron, simultáneamente en el lugar desprovisto de árboles, donde se encuentran los instrumentos meteorológicos y en parcelas ubicadas en el interior del bosque de pinos y del de latifolias. Los datos de las observaciones demuestran que la cantidad mayor del rocío (promedio diario) se corresponde con los lugares abiertos de la estación meteorológica y se estima en entre 0.20-0.24 mm día⁻¹. En Cuba, el rocío se forma diariamente desde las 19 a las 7 horas, excluyendo los días con lluvias o los días con fuertes vientos.

La cantidad total del rocío por año en la Estación Hidrológica Amistad asciende a 72 mm lo que constituye el 4 % de la precipitación en el periodo estudiado (1986 – 1988).

La cantidad del rocío precipitada en la superficie del suelo del bosque de pino o latifolias es considerablemente menor, de entre 0,03-0,05 mm día⁻¹ como promedio, lo que es 6 veces menor que en el lugar abierto. Esta disminución brusca de la cantidad del rocío se explica por la existencia de la cubierta forestal, la cual intercepta y acumula en sus

Tabla 4.12. Cantidad media diaria de rocío en la estación Amistad (mm/día)

Año	Cantidad de mediciones	Lugar abierto (Est. Met.)		Bosque de latifolia		Bosques de conífera		Temperat.M ínima	Humedad del aire a las 7 PM
		Hacia arriba	Hacia abajo	Hacia arriba	Hacia abajo	Hacia arriba	Hacia abajo		
1986	139	0.24	0.21	0.04	0.06	0.04	0.05	20.0	86
1987	214	0.25	0.23	0.03	0.06	0.03	0.04	17.5	87
1988	104	0.24	0.18	0.03	0.04	0.03	0.03	17.0	84
	457	0.24	0.21	0.03	0.05	0.03	0.04	18.0	86

ramas, hojas y acículas la humedad del aire. Este fenómeno se nota considerablemente en los días con rocío abundante, cuando por la mañana en tiempo despejado desde las copas de los árboles se observa un goteo. La cantidad máxima del rocío 0 38 mm se observó el 15 de abril de 1988, en el lugar abierto de la parcela meteorológica Amistad, con la humedad del aire del 72 % y la temperatura de 14.2 °C. La cantidad de humedad que procede, durante la noche, del suelo con hojarasca forestal constituye 0,04-0,06 mm/día. La hojarasca forestal impide la evaporación de humedad desde el suelo, esta afirmación se corrobora al observar los resultados de la tabla anterior, donde se puede apreciar que en el lugar abierto es de 4 a 5 veces mayor que en el bosque.

4.9. Los resultados de la Estación Amistad en el contexto de las observaciones de cambio climático, especialmente en Cuba.

Las intenciones de esta investigación están muy lejos de pretender aportar pruebas irrefutables de la existencia de cambio climático en Cuba. La variabilidad de los procesos que condicionan el clima hace inviable que se puedan sacar grandes

conclusiones del análisis de una serie de solo treinta años. Por consiguiente, como ya se ha indicado al inicio de este capítulo, lo que se pretende con él es únicamente ver si lo que se observa en esta estación concreta y en este período determinado, es o no coherente con las previsiones de cambio climático, muy en especial con las llevadas a cabo en Cuba ya que, tras haber participado activamente en el proceso de negociación para la firma de la Convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CNUCC) la República de Cuba ratificó la Convención el 5 de Enero de 1994 y es parte de la misma desde el 5 de Abril de 1994. Sin embargo, desde inicios de la década de los años 90 ya se manifestaba una notable preocupación por el tema. Aunque la contribución de la República de Cuba al calentamiento global es muy reducida, existe una notable preocupación por los impactos que el cambio climático pueda tener sobre el país. Es por ello que se han desarrollado investigaciones dirigidas a evaluar los posibles impactos de dicho cambio climático e identificar las posibles opciones de adaptación para minimizar los impactos negativos y sacar provecho de aquellos que pudieran resultar positivos.

Temperaturas.

Como es lógico, esta es la variable que más atención ha atraído de los investigadores ya que lo que se supone que lo que le ocurre al planeta es que se encuentra en una fase de calentamiento originada por factores antrópicos, entre los cuales hay que destacar el incremento de la concentración atmosférica de gases con efecto invernadero y también los cambios de uso del territorio, sobre todo la deforestación.

Como un dato indicativo, que resume el acuerdo generalizado sobre el calentamiento de la Tierra, se indica en el IPCC (2007), que del período de 12 años, comprendido entre 1995 y 2006, 11 figuran entre los 12 más cálidos en los registros instrumentales de la temperatura de la superficie mundial, que se iniciaron en el año 1850.

En lo referente a Cuba, probablemente es Fonseca (1989) el primero en observar tendencias de incrementos de las temperaturas medias en series de varias localidades. El mismo proceso es observado con posterioridad por Lapinel *et al.* (1993), Centella *et al.* (1997), Centella *et al.* (1999) y Centella *et al.* (2001). Todos estos autores coinciden en que en las cuatro últimas décadas se ha producido un aumento de alrededor de 0.5

°C. En el análisis detallado de este incremento se destaca que no hay una tendencia significativa a aumentar de las temperaturas máximas que, sin embargo, si existe para las temperaturas mínimas que habrían tenido un incremento de 1.4 °C en estos últimos cuarenta años. Como resultado de ello se hace patente una tendencia clara a la disminución de la oscilación térmica media diaria (Centella *et al.* 2001).

La comparación de los resultados obtenidos en la Estación Amistad con los hasta ahora mencionados muestra las siguientes coincidencias y discrepancias:

- La temperatura media del aire presenta el mismo patrón de incremento que se da en el conjunto del país con los datos de todo el año. Cuando se analizan por separado las estaciones con distinto volumen de lluvia se aprecia solamente una tendencia al aumento en el caso de la época más lluviosa.
- Contrariamente a lo encontrado para Cuba no se ha puesto de manifiesto ninguna tendencia al incremento de las temperaturas mínimas mientras que si se ha observado en las temperaturas máximas absolutas del período lluvioso, fenómeno que no se ha descrito para la isla pero si en países de la cuenca mediterránea como es el caso de España (Abanades *et al.* 2007).

En relación con la temperatura de ríos o arroyos, no existen antecedentes en Cuba de analizar la existencia de tendencias temporales. En el río Danubio en Linz (Austria) en el período 1901 – 1990 se han analizado series donde se observa un incremento de la temperatura media mensual de 0.8 °C para el período, con aumentos mayores en otoño e invierno, pero no se observan tendencias significativas ni para temperaturas del aire, ni para el caudal. Con modelos de regresión que se combinan con los cambios predecibles del clima, se estima que en el año 2030 la temperatura del río en cualquier mes habrá subido más de 1 °C respecto a la actual y más de 2 °C en el período otoñal de bajo caudal (Webb y Nobilis 1994).

Según datos de 30 años (1968 – 1997) de la temperatura de un arroyo que drena una cuenca de 30 Km² en Escocia, no se observaron cambios en la temperatura media anual, pero si en la temperatura máxima durante el invierno (diciembre a febrero) y primavera (marzo a mayo) que se incrementó en esos años significativamente, al igual que ocurre con la temperatura media de primavera. Durante el período no se observa

cambio en el caudal del escurrimiento. La alta correlación existente entre la temperatura del aire y del agua ($R^2 = 0.96$) indica que los cambios en el arroyo corresponden a cambios en el clima (Lancen *et al.* 2001).

Gu – Roy y Li – Yiyian (2002) en un análisis de la sensibilidad de la temperatura del río respecto a otros factores ambientales, encuentran que el efecto del caudal es tan importante como el tiempo meteorológico. Sin embargo, la temperatura máxima del río es más sensible al caudal que la temperatura media.

Precipitación y horas de sol.

A nivel mundial los escenarios de cambio de la precipitación resultan bastante menos predecibles que en el caso de las temperaturas y las conclusiones más recientes señalan que mientras que en ciertos lugares del planeta se han producido aumentos del volumen de lluvia en otros ha disminuido y se constata que la superficie afectada por las sequías es probable que hayan aumentado desde la década de 1970 (IPCC 2007). Las tendencias de las horas de sol vienen siempre asociadas a variaciones de la nubosidad que tienen casi siempre reflejo en la tendencia del volumen de precipitación.

En el caso de Cuba, la misma fuente que indica que la temperatura media anual del aire pudiera aumentar entre 1.6 y 2.5 °C para el año 2100 (INSMET, s/f), afirma que las previsiones sobre la precipitación provocan bastante mayor incertidumbre, dado que algunas estimas indican reducciones, mientras que otras señalan aumentos. Mayor coincidencia existe en la previsión de que, aún en los casos en que las precipitaciones aumenten, puede ocurrir una intensificación y expansión de los procesos de aridez y sequía, debido al notable incremento de la temperatura y el consecuente aumento de los procesos de evaporación.

Las investigaciones llevadas en Cuba han puesto de manifiesto que no se observa tendencia alguna en el volumen de lluvia anual pero si se analizan los periodos de distinta precipitación por separado se aprecia una ligera tendencia al aumento durante el período menos lluvioso y una disminución más significativa en la estación más húmeda (Vega *et al.* 1987, Centella *et al.* 2001), en la cual se constata también una

mayor frecuencia de períodos de sequía y la afectación de áreas más extensas (Centella *et al.* 1999, Solano *et al.* 2007).

La comparación entre los análisis de las series de la Amistad y lo encontrado en el país permite las siguientes observaciones:

- Plena coincidencia en la inexistencia de cualquier tipo de tendencia temporal en los volúmenes de precipitación anual.
- Falta de concordancia en el análisis de las tendencia por épocas ya que mientras que para el conjunto del país se observa un decremento temporal en la época húmeda, en la Amistad se aprecia un incremento en el período analizado, y en el caso de la estación más seca, para Cuba se aprecia un ligero incremento del volumen de precipitación y en la Amistad no se aprecia tendencia significativa pero si se constata cierta disminución en las últimas décadas.

De acuerdo con la falta de una tendencia en la precipitación, que viene a reflejar que no hay una variación temporal significativa en la nubosidad, no se aprecia incrementos ni disminuciones de las horas de sol, ni anuales, ni por épocas de distinta pluviosidad. En algunas áreas de la cuenca mediterránea donde se han detectado disminuciones generales del volumen de lluvia en las últimas décadas, si se ha puesto de manifiesto la coincidencia con un incremento generalizado de la insolación (Abanades *et al.* 2007).

Humedad relativa y evaporación.

Hay que reconocer que mientras que se han publicado un gran número de investigaciones sobre las tendencias esperables en variables como los distintos tipos de valores de temperatura, o las precipitaciones, son mucho más escasos los relacionados con la humedad relativa (van Wijngaarden y Vincent 2007).

En relación con el cambio climático los feedbacks positivos acentúan la perturbación mientras que los negativos la mitigan. El vapor de agua es un buen ejemplo de feedback positivo porque a medida que la temperatura aumenta la cantidad de vapor de agua que puede almacenar el aire se incrementa y como este gas tiene un notable efecto invernadero tiende a acentuar el calentamiento (Bonan 2008)

La mayoría de los modelos de cambio climático han predicho que la humedad relativa se mantendrá relativamente constante pese al calentamiento lo que lógicamente implica un incremento en la humedad específica (g de agua por kg de aire), pero que sería mayor en los trópicos (IPCC 2007). Estudios realizados por la NASA confirman que se ha producido un aumento de la cantidad de vapor de agua en la atmósfera a medida que se ha ido calentando y que aunque esto produzca un feedback positivo tal como han predicho la mayor parte de los modelos de cambio climático, su efecto es de bastante menor intensidad del que al principio se le suponía (Minschwaner 2004). Para los modelos de clima que acoplan los sistemas atmosférico y oceánico parece probado el feedback positivo que representa el aumento del contenido en vapor de agua en la atmósfera pero el efecto de la nubosidad es el causante de cierta incertidumbre por falta de coincidencia entre las diferentes aproximaciones modeladas (Soden y Held 2006).

Los resultados obtenidos en la Amistad con estas dos variables, de las que no se ha encontrado ninguna referencia para Cuba, son probablemente los de mayor interés, ya que en ambas los análisis estadísticos ponen de manifiesto tendencias muy claras y significativas, positivas en el caso de la humedad relativa y negativas para la evaporación. Es evidente que al incremento de la humedad relativa del aire debe corresponder una disminución de su demanda evaporativa, pero si simultáneamente se produce un aumento térmico crecería la humedad específica pero podría no variar la relativa.

En una somera revisión bibliográfica sobre la evolución temporal de los valores de humedad atmosférica media anual en series de finales del siglo XX y principios del XXI se han encontrado tendencias negativas en el caso de Canadá (Wijngaarden y Vincent 2007) y en el área no tropical de Australia (CSIRO 2007). Tres son, sin embargo los casos que, en coincidencia con lo descrito en la estación Amistad, se observan tendencias positivas significativas de la humedad relativa. En Jordania (Abu-Taleb *et al.* 2007) se han observado aumentos de la humedad relativa en cinco estaciones del país, pero en solo una de ellas la tendencia resulta ser estadísticamente significativa. En el sur de Taiwan, con datos de cuarenta y ocho años de observaciones se aprecian tendencias significativas persistentes, tanto en el temperatura como en la humedad relativa (Shan Yu *et al.* 2002). Por último en una serie de cuencas de la India central se

ha vista que en la mayoría de ellas se produce una tendencia temporal positiva tanto en la precipitación anual como en los valores medios por año de la humedad relativa (Pratap *et al.* 2008).

Recientemente (Paltridge *et al.* 2009) en un nuevo análisis de los datos de humedad obtenidos por radiosondas ha permitido observar, en los últimos 35 años, una tendencia negativa significativa de la humedad específica a altitudes bajas lo que generaría que el feedback con la temperatura fuese negativo en lugar de positivo, que es como lo consideran la casi totalidad de los modelos climáticos.

4.10. CONCLUSIONES:

- El conjunto de las observaciones climáticas de la estación Amistad, que se aportan en esta investigación, proporciona unos valores medios de las distintas variables que resultan acordes con las cartografías climáticas y otros estudios hasta ahora publicados en Cuba.
- Se observa una tendencia al aumento en la temperatura media del aire y en el caso de la temperatura del arroyo se aprecian tendencias al incremento en algunos meses del año, algunas de las cuales, podrían no ser debidas a las variaciones de caudal.
- Al igual que ocurre en el resto del país, cuando se analizan por separado las tendencias de las temperatura en épocas seca y húmeda, no se aprecia un aumento en la primera de ellas pero si en la que recoge el mayor porcentaje de la precipitación.
- No se aprecia en la Amistad la tendencia al incremento de las temperaturas mínimas medias observada para el conjunto de Cuba, y sin embargo si se ha encontrado en las temperaturas máximas absolutas del período lluvioso
- En el caso del volumen de precipitación anual no se detectan tendencias ni en el país ni en la estación. Sin embargo, si se analizan los periodos por separado, en la estación con más volumen de lluvia, para el total de Cuba se ha encontrado una disminución significativa, mientras que en Amistad se observa un aumento. En el caso de la época menos lluviosa se ve un incremento significativo en el

conjunto del país y no se aprecia una pauta de variación significativa en la Amistad.

- Ni en Cuba ni en la Amistad se ha observado una variación temporal del número de horas de sol, ni en el conjunto del año ni en las épocas de distinta pluviosidad.
- Destaca en la estación Amistad, un incremento de la humedad relativa, muy significativo, tanto para los datos anuales como para los de seca y húmeda, lo que contrasta con la opinión generalizada entre los expertos que predecían una mayor constancia de esa variable.
- A esta tendencia creciente le corresponde, en el caso concreto de la Amistad una decreciente de los valores de evaporación, que también resulta muy significativa en los datos de todo el período anual o por semestres.

CAPÍTULO 5.- CUANTIFICACION DE LOS FLUJOS HIDROLÓGICOS EN EL ECOSISTEMA PINAR.

5.1. INTRODUCCION

La cuantificación de los flujos hídricos asociados a la parte aérea del bosque (trascolación, escurrimiento cortical e interceptación) reviste gran interés ya que esto juega un papel importante en el balance hídrico. Según Llorens y Domingo (2007) el importante papel que la partición de la lluvia por la vegetación puede jugar en el balance del agua y como consecuencia en los recursos hídricos, es bien conocido.

Trascolación es la que se obtiene por la captación de los pluviómetros ubicados debajo de las copas o sea la cantidad de agua que llega a cada punto del suelo forestal (Lee 1980; Aussenac 1968; Ford y Deans 1978) citado por Bellot (1989).

Escurrecimiento cortical es la parte de las precipitaciones que penetra bajo la cubierta de los bosques y escurre por los fustes de los árboles. Este flujo hídrico tiene mucha importancia para la vida del árbol porque humedece directamente las raíces. Con el escurrimiento por los fustes se introducen en el suelo muchas sustancias nutritivas que se lavan de las ramas y la corteza de los árboles, mejorando la nutrición de éstos.

La Interceptación es una parte importante de la lluvia que cae sobre las zonas boscosas de las cuencas hidrográficas, la cual se evapora a través de las partes aéreas de los árboles y del manto vegetal por debajo de ellos. Esta parte de la lluvia interceptada por la vegetación forestal, según el criterio de muchos investigadores es la pérdida de agua esencial o fundamental que experimentan las cuencas forestales en su balance hídrico por lo que para investigar la influencia de la vegetación sobre el régimen hidrológico de las cuencas hay que prestar especial atención al estudio de este componente.

Los objetivos del presente capítulo son:

- Analizar los flujos hidrológicos: trascolación, escurrimiento cortical e interceptación, en el ecosistema pinar (pinar y bosque de galería).
- Analizar el comportamiento de los colectores para estimar la trascolación

- Elaborar modelos para predecir los flujos hidrológicos
- Corroborar si los valores de los flujos hidrológicos se corresponden con los obtenidos por otros investigadores, especialmente en el caso de las coníferas.
- Determinar en general el comportamiento de los flujos hidrológicos entre coníferas y latifolias y en particular si el escurrimiento cortical difiere significativamente entre el *Pinus tropicalis* y el *Pinus caribaea*.

Las hipótesis relacionadas con dichos objetivos son:

- Las particularidades de los flujos hidrológicos en el ecosistema pinar estarían dados, por el bosque de galería y el pinar en la parte superior como formación, y por otro lado la morfología de las especies que lo componen.
- Dadas las diferentes variables que influyen en el transcurso de las precipitaciones, no todos los colectores deben mostrar la misma eficiencia y en el caso de las coníferas dadas su características, la trascolación debe ser mayor.
- Es posible predecir los flujos hidrológicos a partir de las características de las precipitaciones.
- Los valores de los flujos hidrológicos en los bosques de la estación hidrológica “Amistad” se corresponden con los obtenidos por otros investigadores.
- Los flujos hidrológicos deben diferir entre coníferas y latifolias y dadas las características morfológicas del *Pinus tropicalis*, el escurrimiento cortical debe ser mayor en éste que en *Pinus caribaea*.

5.2. Análisis estadístico del conjunto de datos 1982, 1983 y 1984.

En el periodo 1982 – 1984 se registraron 326 precipitaciones, de las cuales se eliminaron 18 pues en esos casos los valores de la trascolación superaban la precipitación a cielo abierto, lo cual se atribuye a la formación de vías preferentes a través de ramas y lianas. En la tabla 5.1 se presenta la descripción estadística de las variables relacionadas con las mismas:

Tabla 5.1. Resumen de las precipitaciones (1982 – 1984)

Variable	N	Media	ESM	DS	CV	%
Duración (min.)	308	202,8	14,6	257,0	126,71	-
Intensidad	308	0,160	0,013	0,239	149,59	-
PPCA (mm)	308	15,87	1,19	20,94	131,98	-
PPBCC (mm)	308	12,88	1,03	18,13	140,70	81,19
PPBCL (mm)	308	11,655	0,907	15,91	136,52	73,44
ECC (mm)	308	0,287	0,036	0,636	221,46	1,81
ECL (mm)	308	0,265	0,031	0,544	205,22	1,67
IC (mm)	308	2,698	0,371	6,512	241,35	17,0
IL (mm)	308	3,950	0,387	6,793	172,00	24,89

PPCA = Precipitación promedio a cielo abierto
 PPBCC = Precipitación promedio bajo copa coníferas
 PPBCL = Precipitación promedio bajo copa latifolias
 ECC = Ecurrimiento cortical coníferas
 ECL = Ecurrimiento cortical latifolias
 IC = Interceptación coníferas
 IL = Interceptación latifolias

ESM= Error estándar de la media
 DS = Desviación estándar
 CV = Coeficiente de variación

Como se observa, la variabilidad es alta en todos los casos, lo cual es lógico teniendo en cuenta las peculiaridades del fenómeno que se investiga sobre el cual influyen muchas variables directas e indirectas. El comportamiento de la precipitación, trascolación, escurrimiento e interceptación anual para el periodo analizado se muestra en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Valores de precipitación, trascolación, escurrimiento e interceptación por años

	PPCA (mm)	PPBCC (%)	PPBCL (%)	ECC (%)	ECL (%)	IC (%)	IL (%)
1982	1583,48	79,97	69,93	0,88	1,05	19,16	29,02
1983	1836,05	81,64	74,93	2,49	2,17	15,87	22,90
1984	1468,31	81,94	75,38	1,97	1,71	16,09	22,91
Promedio	1629,28	81,19	73,44	1,81	1,67	17,00	24,89

Como se observa en general los valores se mantienen bastante estables, las mayores variaciones se producen en el escurrimiento cortical, fundamentalmente en coníferas y en la interceptación en el caso de las latifolias.

Después se realizó una comparación de medias para las variables: trascolación, escurrimiento e interceptación en coníferas y latifolias, obteniéndose como resultado que existen diferencias significativas para la primera y la tercera, sin embargo para el escurrimiento no hay diferencia significativa, los resultados estadísticos se muestran en la tabla 5.3:

Tabla 5.3. Resultados de la comparación de medias

Estadísticos de contraste(c)			
	Trascolación Latifolias - Trascolación Coníferas	Escurrimiento C. Latifolias - Escurrimiento C. Coníferas	Interceptación Latifolias - Interceptación Coníferas
Z	-9,745(a)	-,069(a)	-9,883(b)
Sig. asintót. (bilateral)	,000	,945	,000

a Basado en los rangos positivos.

b Basado en los rangos negativos.

c Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon

5.2.1. Evaluación de posibles modelos para estimación de variables

Para este fin se hizo la matriz de correlación para conocer el comportamiento de la trascolación, el escurrimiento y la interceptación (tanto en coníferas como en latifolias frente a la precipitación a cielo abierto (cantidad), duración e Intensidad, comprobándose que la variable precipitación es la que guarda una relación más estrecha con las tres, más acentuada en el caso de la trascolación con un valor de 0,987 para coníferas y 0,969 en latifolias, la duración y la intensidad mostraron valores por debajo de 0,5.

Se realizó un análisis de regresión probando todos los modelos posibles, en el caso de la trascolación, tanto para coníferas como para latifolias, y el modelo de mejor ajuste para las primeras fue el Potencial y para las segundas el modelo Cuadrático. Los

modelos fueron corridos para valores de precipitación a cielo abierto entre 1 y 100 mm, comprobándose que hasta valores de alrededor de 50 mm realizaban una buena predicción.

A continuación se brinda la información correspondiente a ambos modelos:

Modelo 1. Trascología en función de la precipitación a cielo abierto (Coníferas)

$$y = \exp(0.555 * x^{1,113})$$

y = Trascología

x = Precipitación a Cielo Abierto

Resumen del modelo

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
,971	,942	,942	,342

La variable independiente es PACA.

ANOVA

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	535,172	1	535,172	4577,658	,000
Residual	32,735	280	,117		
Total	567,907	281			

La variable independiente es PACA.

Modelo 2. Trascología en función de la precipitación a cielo abierto (Latifolias)

$$y = -1.633 + 0.9154 * x - 0.00194 * x^2$$

Donde:

y = Trascología

x = Precipitación a Cielo Abierto

Resumen del modelo

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
,977	,954	,954	3,415

ANOVA

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	67268,280	2	33634,140	2883,390	,000
Residual	3254,476	279	11,665		
Total	70522,756	281			

A continuación se realiza un análisis por separado de la trascolación, el escurrimiento cortical y la interceptación.

5.3 Trascolación

Según Bellot (1988) la variabilidad espacial de la trascolación en un bosque ha sido abordada por diferentes autores en diferentes tipos de bosque. El hecho de que el coeficiente de variación oscile mucho de unos días a otros ha sido puesto en evidencia en varias ocasiones (Kimmins 1973); sin embargo también se han encontrado ciertas regularidades pues Patric (1965), Aussenac (1970) y Helvey y Kimmins (1973) indican que el coeficiente de variación acostumbra a disminuir cuando aumentan los caudales de precipitación. En cuanto a los factores responsables de esta variabilidad, Aussenac (1970) cita, por orden de importancia, primero la cantidad de precipitaciones, segundo la velocidad del viento, tercero intensidad de la lluvia y en último lugar al desfronde existente.

Huber e Iroume (2001) indican que la trascolación varía entre el 55% y el 83 % de las precipitaciones y es mayor en las parcelas de coníferas que en las de latifolias, aunque las diferencias no son estadísticamente significativas. Marín, Bouten y Sevink (2000) en estudios realizados en cuatro ecosistemas forestales encontraron variaciones en la trascolación entre 82 % y 87 % de las precipitaciones y plantean que la misma es función de las precipitaciones, pero también de características estructurales del bosque, sobre todo el grado de apertura del dosel.

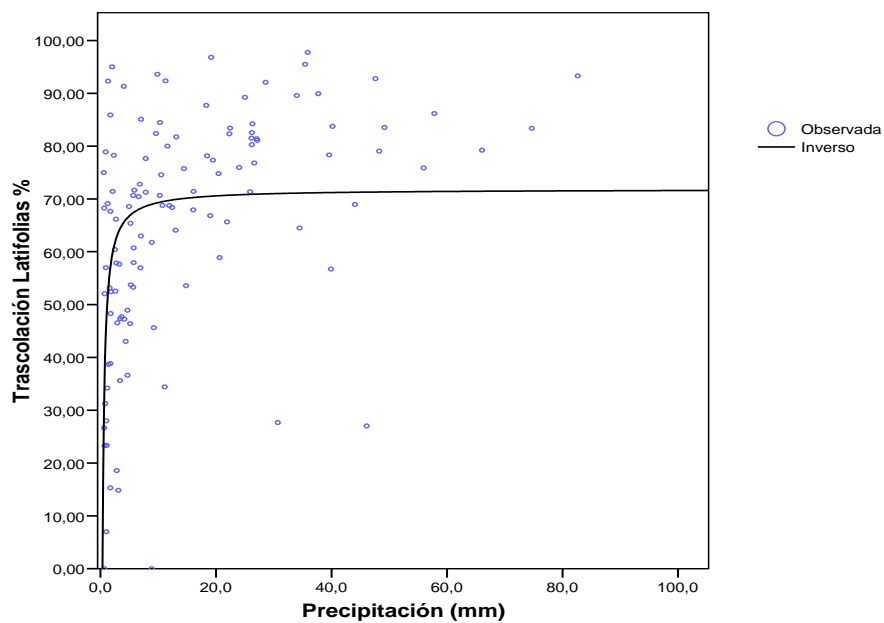
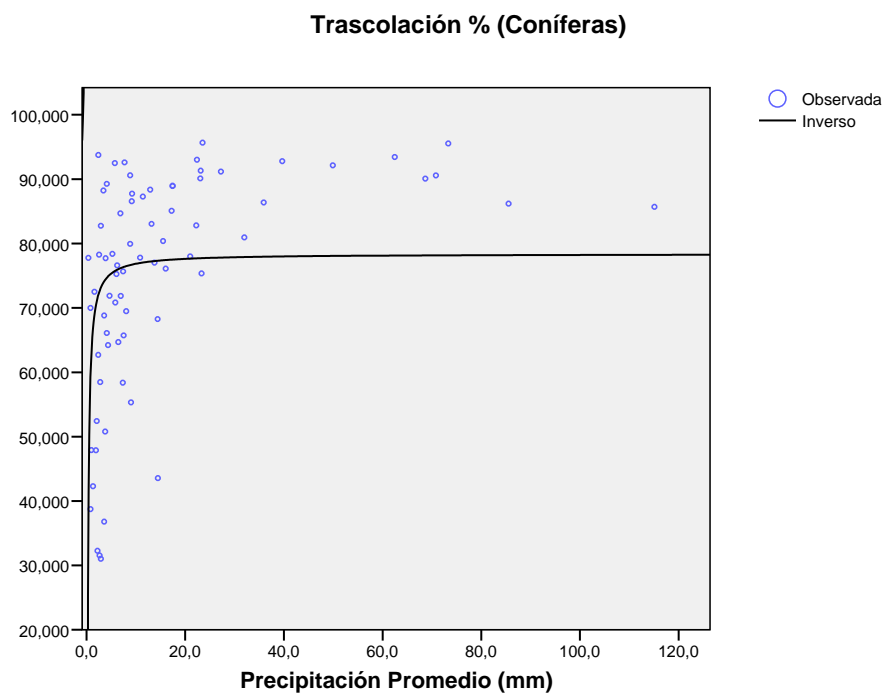
Park-Yeong, Lee-Don y Kim-Dong (1999) encontraron porcentajes de trascolación del 85 % en una parcela de *Larix*, 84.5 % y 83.2 % en parcelas de *Pinus*, con y sin raleo previo y 81.2 % en latifolias. Godoy, Oyarzun y Bahamondes (1999) estimaron que en precipitaciones de 5332 mm (78 % lluvia y 22 % nieve), 4701 mm fueron trascolación para un 88.1 %. Navar, Charles y Jurado (1999) en sus investigaciones determinaron valores de trascolación de 78.1 %. Bellot y Escarré (1998) para el conjunto del bosque, y teniendo en cuenta la densidad, composición específica y clases diamétricas,

estimaron que el 75 % de la precipitación llega al suelo como trascolación. Xiao Dai *et al.* (2002) en bosque mixto de pinos y latifolias determinaron valores de trascolación de 68.6 %. Price y Carlyle (2003) en bosque mixto de latifolias y coníferas determinaron un 77.5 % de trascolación. Buvaneswaran, George y Mohan (2003) en una plantación de Teca de 30 años de edad y una densidad de 622 árboles/ha estimaron un 51.2 % de trascolación.

Llorens y Domingo (2007) realizaron una interesante reseña de la partición de la lluvia por la vegetación bajo condiciones mediterráneas, cerca de 90 artículos de estudios llevados a cabo en Francia, Grecia, Italia, Portugal y España publicados en diferentes fuentes fueron analizados mostrando de forma detallada los resultados, entre ellos informan los siguientes resultados de trascolación (%) para pinos:

Pinus halepensis (78.5, 58.9, 52.7), *Pinus nigra* (84.3), *Pinus sylvestris* (73.1, 80.7, 83.2). Para *Quercus ilex* en sitios estudiados en España, Grecia y Francia se presentan resultados que oscilan entre 59.7 y 77.8.

Los resultados obtenidos en la presente investigación arrojan 73.4 % en latifolias y un 81.2 % en coníferas respecto al total de lluvia del área de la estación “Amistad” (Figuras 5.1 y 5.2). Estos resultados se corresponden con los citados anteriormente y lo indicado por Bellot (1989) cuando plantea que el porcentaje de trascolación respecto a la precipitación varía ajustándose a una función hiperbólica, y una vez superado el umbral de interceptación aumenta rápidamente el porcentaje de trascolación que alcanza la asíntota entre el 70 % y el 80 %.



Figuras 5.1 y 5.2 Representación de la trascolación en % respecto a la precipitación en la estación hidrológica “Amistad”, coníferas y latifolias.

5.3.1. Análisis del comportamiento de los colectores utilizados para registrar la trascolación.

En el año 1984 se emplearon 6 pluviómetros para estimar la trascolación tanto en latifolias como en coníferas, en 1985 se mantuvieron los 6 de las latifolias, pero en las coníferas se emplearon 10. A continuación se muestran los resultados estadísticos obtenidos de las regresiones lineales entre la precipitación a cielo abierto y el volumen de agua colectado por cada pluviómetro, tanto para coníferas como latifolias, de forma individual, y todos unidos. Como se puede apreciar en todos los caso las regresiones son muy significativas y al ordenar sus pendientes se observa que el año 84 en el caso de las latifolias el colector más eficiente es el número 2 y en las coníferas el número 6. Al analizar los resultados de todos los colectores ese año y el 85 se comprueba que resultan más eficientes los colectores de las coníferas, pero en este último año la diferencia es mínima.

Latifolias 1984

Pluviómetro	n	B ₀	B ₁	R ²	Sig.
2	89	-0,882	1,023	0,954	0.000
3	89	-1,308	0,869	0,962	0.000
5	89	-1,063	0,855	0,928	0.000
4	89	-0,934	0,799	0,966	0.000
6	89	-0,941	0,79	0,952	0.000
1	89	-0,95	0,769	0,969	0.000

Todos	534	-1,013	0,851	0,937	0.000
-------	-----	--------	-------	-------	-------

Latifolias 1985

Pluviómetro	n	B ₀	B ₁	R ²	Sig.
2	126	-1,404	1,213	0,875	0.000
6	126	-2,097	1,064	0,863	0.000
3	126	-1,159	0,982	0,943	0.000
1	126	-0,95	0,796	0,965	0.000
4	126	-0,656	0,712	0,906	0.000
5	126	-1,363	0,683	0,896	0.000

Todos	756	-1,272	0,908	0,839	0.000
-------	-----	--------	-------	-------	-------

Coníferas 1984

Pluviómetro	n	B ₀	B ₁	R ²	Sig.
6	89	-1,48	1,052	0,953	0.000
5	89	-1,571	1,007	0,967	0.000
2	89	-1,037	0,936	0,952	0.000
1	89	-1,13	0,924	0,97	0.000
4	89	-0,847	0,889	0,947	0.000
3	89	-0,874	0,855	0,923	0.000

Todos	534	-1,156	0,944	0,946	0.000
-------	-----	--------	-------	-------	-------

Coníferas 1985

Pluviómetro	n	B ₀	B ₁	R ²	Sig.
16	126	-1,149	0,936	0,973	0.000
8	126	-1,254	0,931	0,966	0.000
10	126	-1,257	0,931	0,964	0.000
7	126	-1,067	0,926	0,96	0.000
9	126	-1,126	0,918	0,973	0.000
15	126	-0,906	0,917	0,963	0.000
12	126	-0,93	0,897	0,964	0.000
11	126	-0,874	0,895	0,969	0.000
14	126	-0,709	0,889	0,97	0.000
13	126	-1,033	0,846	0,952	0.000

Todos	1260	-1,031	0,909	0,964	0.000
-------	------	--------	-------	-------	-------

Al aplicar la prueba de Kolmogorov-Smirnov se comprobó que los valores de la pendiente se corresponden con la distribución normal, lo que corrobora los resultados de la regresión lineal en el sentido de que en la medida que aumenta la cantidad de precipitación se hace mayor la trascolación. Al aplicar la prueba de t para comparar las pendientes entre coníferas y latifolias, y entre éstas últimas en los años 84 y 85, se observa que en el primer caso el valor del nivel crítico es menor que 0.05 por lo que se rechaza la hipótesis de igualdad de medias y se puede afirmar que la trascolación en coníferas es significativamente mayor que en las latifolias, en el segundo caso se comprueba que no existen diferencias significativas.

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

		Pendiente Coníferas 1984	Pendiente Coníferas 1985	Pendiente Latifolias 1984	Pendiente Latifolias 1985
N		6	10	6	6
Parámetros normales(a,b)	Media	,9438	,908600	,8508	,9083
	Desviación típica	,07354	,0275649	,09281	,21186
Diferencias más extremas	Absoluta	,209	,220	,256	,202
	Positiva	,209	,160	,256	,202
	Negativa	-,138	-,220	-,189	-,144
Z de Kolmogorov-Smirnov		,512	,695	,626	,495
Sig. asintót. (bilateral)		,956	,720	,827	,967

a La distribución de contraste es la Normal.

b Se han calculado a partir de los datos.

Prueba de muestras relacionadas

		Diferencias relacionadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desv. tip.	Error tip. de la media	95% Intervalo de confianza para la diferencia				
		Inferior	Super.		Inferior	Superior			
Par 1	Pend. Coníferas 1984 - Pend. Latifolias 1984	,09300	,03840	,01568	,05270	,13330	5,932	5	,002
Par 2	Pend. Latifolias 1984 - Pend. Latifolias 1985	-,05750	,12954	,05289	-,19345	,07845	-1,087	5	,327

Para comprobar el comportamiento de los colectores en función de la cantidad de lluvia caída se calculó (para el caso de los 10 pluviómetros en coníferas, 1985) el coeficiente de variación de los colectores en cada evento y luego se procedió a la representación gráfica de la precipitación a cielo abierto frente al coeficiente de variación de la trascolación (ver figura 5.3) comprobándose que la mayor variación se produce para precipitaciones inferiores a 10 mm, a partir de ese valor disminuye el coeficiente de variación y se hace más estable.

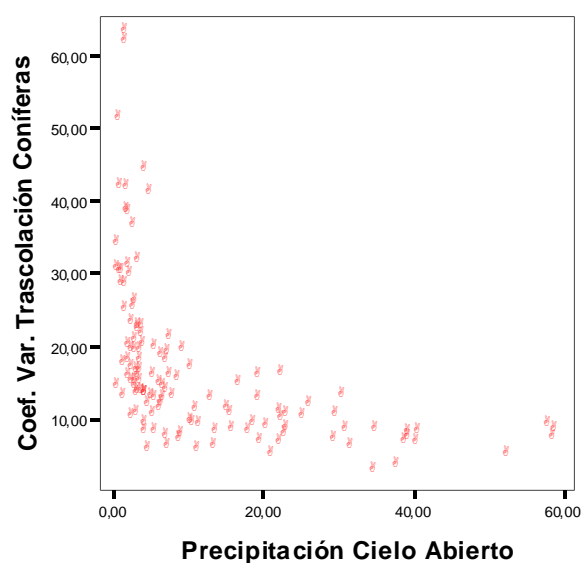
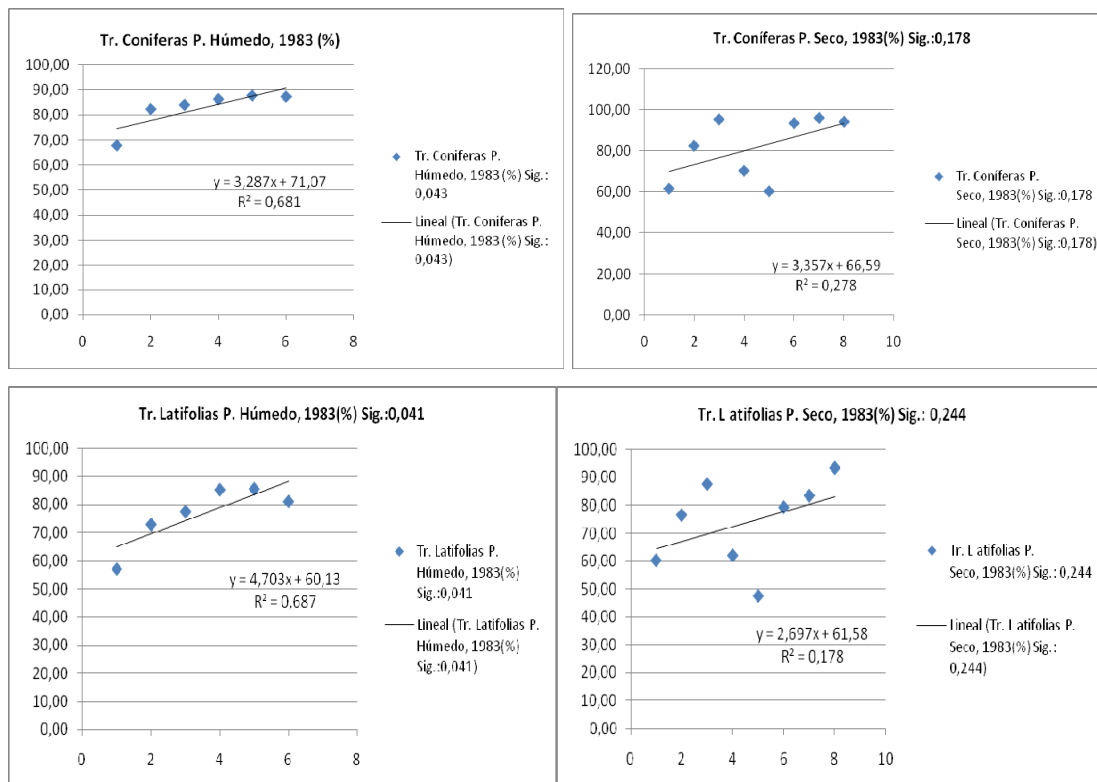


Figura 5.3. Comportamiento del coeficiente de variación de la traslación en coníferas.

5.3.2. Comportamiento de la traslación en periodos húmedo y seco y según intervalos de precipitación.

En las figuras 5.4 a 5.7 se representa, para coníferas y latifolias (año 1983), el comportamiento de la traslación frente a la precipitación a intervalos: (0 -10, 10,1-20, 20.1-30...) como se observa a medida que aumenta la precipitación se incrementa el por ciento de traslación y ésta es mayor en el periodo seco que en el húmedo, lo cual se puede atribuir fundamentalmente a la caída de las hojas de los árboles. La comparación no es pertinente porque las regresiones lineales en las épocas de seca no presentan un ajuste lineal significativo.



Figuras 5.4 a 5.7 Comportamiento de la trascolación en coníferas y latifolias en período húmedo y seco en función de intervalos de precipitación.

5.4 Escurrimiento cortical.

Las numerosas investigaciones que se han realizado en este sentido, cuyos resultados se encuentran generalizados en los trabajos de Kitzedzd (1951), Molchanov (1961), Rakmanov (1984) y otros, indican que el escurrimiento por los fustes casi siempre es insignificante ya que constituye el 1-2 % del total de las precipitaciones y que el volumen de escurrimiento depende de la edad y densidad de la plantación. Además, en los rodales viejos con árboles que tienen la corteza muy áspera que pueden retener mayor cantidad de agua, el escurrimiento disminuye en comparación con las plantaciones jóvenes. La composición de especies de las plantaciones también influye sobre el volumen de escurrimiento.

Casi todas las investigaciones que se han realizado sobre el escurrimiento cortical han sido en zonas templadas. En su información resumen Rakmanov (1984) señala que

las investigaciones realizadas en dos parcelas del bosque tropical húmedo (Venezuela) permitieron revelar la influencia del diámetro del árbol sobre el escurrimiento. En Cuba el primer trabajo realizado en esta temática fue por el búlgaro Kerenski (1975) llevado a cabo en los árboles del bosque alto de baja calidad en Sierra del Rosario donde obtuvo un escurrimiento por el fuste que representó el 7.8 % de la lluvia total.

Según Huber e Iroume (2001) el escurrimiento cortical varía entre el 1 y el 13 % de las precipitaciones en las coníferas y entre el 1 y el 8 % en las latifolias, por su parte Marin, Bouten y Sevink (2000) plantean que el escurrimiento cortical es muy bajo, crece de forma potencial al crecer las precipitaciones y representa únicamente el 1.1 % de las mismas. Park-Yeong; Lee-Don y Kim-Dong (1999) determinaron valores de escurrimiento cortical de 0.8 % en *Larix*, de 1.2 y 1.3 % en las parcelas de pinar con y sin raleo y 2.7 % en la parcela de latifolias. Godoy, Oyarzun y Bahamondes (1999) señalan que en precipitaciones de 5332 mm (78 % lluvia y 22 % nieve), 481 mm fueron de escurrimiento cortical lo que representa un 9 %. Navar; Charles y Jurado (1999) en sus investigaciones determinaron valores de escurrimiento de 3 %. Bellot y Escarré (1998) en bosque denso de rebrotes determinaron un escurrimiento cortical de 12.1 %. Xiao Dai *et al.* (2002) en bosque mixto de pinos y latifolias determinaron valores de escurrimiento cortical de 8 %. Price y Carlyle (2003) en bosque mixto de latifolias y coníferas determinaron un 3.7 % de escurrimiento cortical. Buvaneswaran, George y Mohan (2003) en una plantación de Teca de 30 años de edad y una densidad de 622 árboles/ha estimaron un 7.4 % de escurrimiento cortical.

Lossaint y Rapp (1971) plantean que no se produce escorrentía cortical de forma significativa hasta que la precipitación no supere 12 l/m², cuando los árboles son maduros y con corteza rugosa.

Según Bellot (1988) algunos autores han tratado de comprobar la relación del escurrimiento cortical con parámetros que definen la forma, estructura y dimensiones de los árboles con resultados diversos. Mientras que Ford y Deans (1978) y Rapp e Ibrahim (1978) no encuentran relaciones significativas entre este flujo y el diámetro del tronco a 1.30 m, Jordan (1980) si encuentra que esta relación es significativa. Szabó (1985) profundiza algo más comprobando que además del diámetro 1.30 m, la proyección de la copa y el ángulo de inserción de las ramas al tronco contribuyen de

forma significativa a este flujo. En otras ocasiones, el factor que determina la relación significativa o el tipo de expresión es el estado fenológico de la especie arbórea (Brinson 1980; Schnock y Galoux, 1980)

En el estudio realizado por Llorens y Domingo (2007) comentado en el epígrafe 5.3 se presentan resultados para el escurrimiento cortical que varían entre 12.3 y 0.4 % para coníferas, entre ellos 1.7 para *Pinus halepensis*, 0.8 para *Pinus nigra* (Grecia) y 12.3 % (España), 1.5 % para *Pinus pinaster*, 2.3 % para *Pinus pinea*.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo indican que en los bosques de la Estación Hidrológica Amistad el escurrimiento por los fustes constituye (como promedio para 3 años) el 1,81 % de las precipitaciones del lugar en los bosques de coníferas y el 1,67 % en los de latifolias valores que se enmarcan dentro de los rangos planteados por los autores citados anteriormente (Figuras 5.8 y 5.9). En general tanto en las coníferas como en las latifolias, est flujo hídrico está relacionado con la morfología de la especie, entre ellos características de la corteza, disposición de las hojas en las ramas y estas a su vez en el tronco, así como el ángulo de inserción.

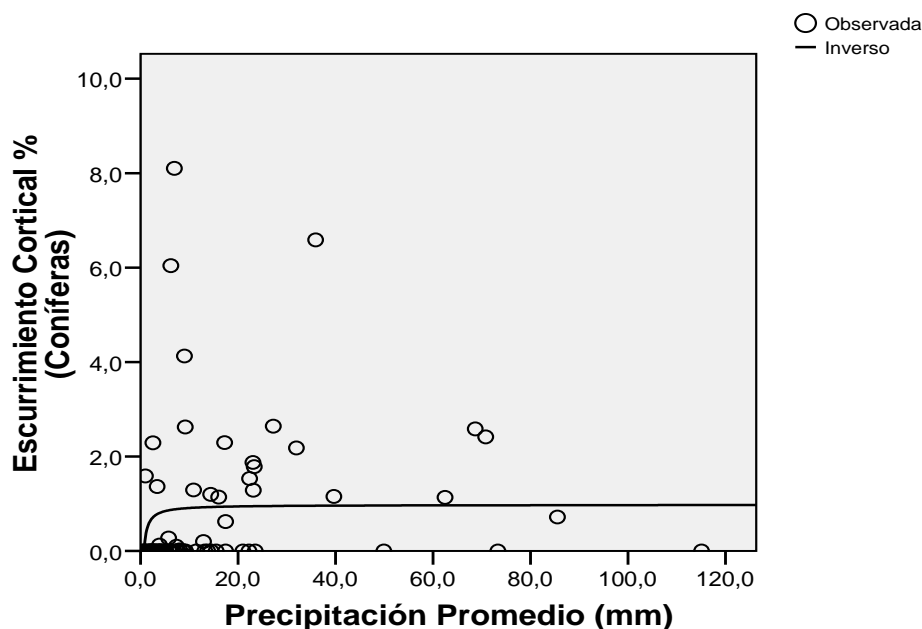


Figura 5.8.- Representación del escurrimiento cortical en % respecto a la precipitación en la estación hidrológica Amistad en coníferas.

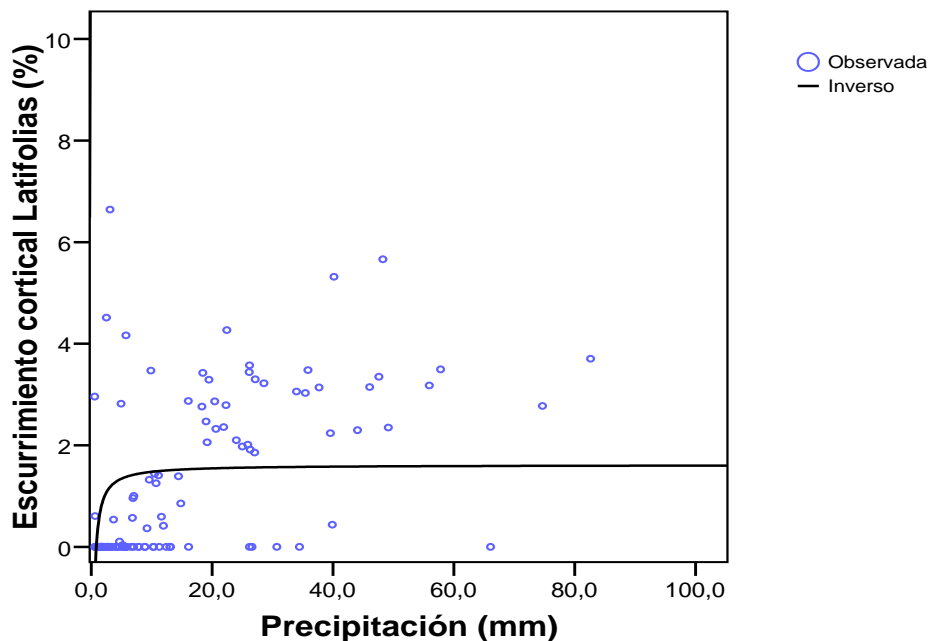


Figura 5.9. Representación del escurrimiento cortical en % respecto a la precipitación en la estación hidrológica Amistad en latifolias.

La diferencia que existe entre el escurrimiento cortical de los bosque de coníferas y el de las latifolias se explica por la mayor espesor del follaje que tiene el bosque de latifolias (densidad 100 %), y que en su composición hay muchos árboles con corteza gruesa y porosa. Además de esto, sobre la magnitud del escurrimiento por los fustes, en el bosque de latifolia influye negativamente la existencia de lianas (bejucos), sobre todo aquellas que anillan de 2-3 veces en el árbol hospedero. En la parcela experimental N° 3, algunos árboles están expuesto a la influencia de estas lianas, lo que provoca que un por ciento de las precipitaciones se escurra por ellas.

5.4.1. Estimación del escurrimiento en función de la precipitación para coníferas.

Los valores del escurrimiento guardan una relación directa con la precipitación total, no comportándose de igual forma con respecto a la duración y la intensidad. Con la finalidad de obtener modelos preliminares que permitan estimar el valor del escurrimiento en función de la precipitación a cielo abierto se realizó un análisis de regresión para el caso de las coníferas, el modelo de mejores resultados fue el cuadrático.

Modelo 1. Pino hembra (*Pinus tropicalis*)

$$Y = -0.3103 + 0.0742 * x - 0.0006 * x^2$$

Y= Esguerrimiento por el fuste en mm

x = Precipitación a cielo abierto en mm (PACA)

Resumen del modelo

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
,688	,473	,417	,615

ANOVA

	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	6,434	2	3,217	8,516	,002
Residual	7,178	19	,378		
Total	13,611	21			

La variable independiente es Precipitación a cielo abierto.

Modelo 2. Pino macho (*Pinus caribaea*)

$$Y = -0.0513 + 0.0141 * x + 0.0002 * x^2$$

Resumen del modelo

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
,920	,846	,829	,144

ANOVA

	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	2,144	2	1,072	52,032	,000
Residual	,392	19	,021		
Total	2,536	21			

La variable independiente es Precipitación a cielo abierto.

5.4.2. Comparación del esguerrimiento en coníferas y latifolias

La tabla 5.4 resume el análisis de 25 lluvias en iguales fechas para los cuatro primeros árboles de la parcela 1 de coníferas y para los 5 de la parcela de latifolias en mm.

El por ciento de escurrimiento con respecto a la precipitación a cielo abierto para el caso de las coníferas es mucho mayor para *P. tropicalis* con 13.85 y 8.92 para los árboles 3 y 4, muy superior al 2.09 % del árbol 1 (*P. caribaea*), a pesar de que este tiene un área de copa mucho mayor. En el caso de las latifolias se puede apreciar la marcada diferencia del macurije respecto a las demás especies, sólo superada por *P. tropicalis*. Obsérvese que al hacer el análisis del por ciento de escurrimiento de cada árbol con respecto al escurrimiento total, *P. tropicalis* es la especie con mayores valores de ese indicador, seguida por el macurije (Tabla 5.4).

Tabla 5.4. Escurrimiento cortical en mm para coníferas y latifolias.

Especie	PACA (mm)	Área copa	EC (mm)	EC (%)	ECT (mm)	% del ECT
1 <i>Pinus caribaea</i>	552.46	18.70	11.57	2.09	183.55	6.30
2 <i>Pinus caribaea</i>	552.46	12.60	5.55	1.00	183.55	3.02
3 <i>Pinus tropicalis</i>	552.46	12.80	76.5	13.85	183.55	41.68
4 <i>Pinus tropicalis</i>	552.46	12.00	49.28	8.92	183.55	26.85
Ocuje	552.46	47.60	0.51	0.09	183.55	0.28
Jagua	552.46	14.70	2.15	0.39	183.55	1.17
Yaba	552.46	15.70	2.69	0.49	183.55	1.47
Almacigo	552.46	30.70	8.34	1.51	183.55	4.54
Macurije	552.46	48.20	26.96	4.88	183.55	14.69
Total	552.46		183.55	33.22		100.00

PACA = Precipitación a Cielo Abierto; EC = Escurrimiento Cortical; ECT = Escur. Cortical Total.

Para las 25 lluvias a que se hizo referencia anteriormente se procedió a promediar los valores de escurrimiento en milímetros para *Pinus caribaea* (Pc), *Pinus tropicalis* (Pt), para ambas especies de pino y para las cinco especies de latifolia y luego se realizó

una comparación de medias obteniéndose los resultados que se muestran a continuación:

Estadísticos de contraste(c)

	Escurrecimiento medio Pt - Escurrecimiento medio Pc	Escurrecimiento medio Latifolias - Escurrecimiento medio Pc	Escurrecimiento medio Latifolias - Escurrecimiento medio Pt	Escurrecimiento medio Latifolias - Escurrecimiento medio Coníferas
Z	-3,787(a)	-1,156(a)	-3,459(b)	-3,468(b)
Sig. asintót. (bilateral)	,000	,248	,001	,001

a Basado en los rangos negativos.

b Basado en los rangos positivos.

c Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon

Como se puede observar se comprueba la hipótesis de que el escurrimiento en Pc difiere significativamente del escurrimiento en Pt, se observa además que el escurrimiento de las latifolias no difiere del que se produce en Pc, pero si del Pt.. A diferencia de lo que se presenta en la tabla 5.3 del epígrafe 5.2 para los datos generales donde no hay diferencia significativa para el escurrimiento entre coníferas y latifolias, para este caso particular si la hay y ello obedece a que en este caso el balance entre Pc y Pt es igual, pero de forma general en el área de estudio predomina el Pc sobre el Pt.

En la tabla 5.5 se muestra el escurrimiento en litros, los valores de la columna EC % coinciden con los de la tabla anterior ya que se tiene en cuenta el área de copa de cada una de las especies, ahora bien cuando se calcula el por ciento de escurrimiento de cada especie con respecto al escurrimiento total en litros, como en este caso no se tiene en cuenta el área de copa, se observa que el macuriye (*M. apetala*) le saca casi un 10 % al árbol 3 de *P. tropicalis*, por lo que dado el caso de que en este estudio solo se tiene en cuenta a un individuo de esta especie, debería profundizarse la investigación de la misma, pues parece prometedora para incluirla en los planes de reforestación, convenientemente mezclada con *P. caribaea*, ya que ayudaría a un mejor aprovechamiento de la lluvia caída.

Tabla 5.5. Esgurrimiento cortical en litros (coníferas y latifolias).

Especie	PACA (mm)	Área copa	Precipitación (Litros)	EC (Litros)	EC (%)	ECT (Litros)	% del ECT
1 Pc	552.46	18.70	10331.00	216.35	2.09	3510.46	6.16
2 Pc	552.46	12.60	6961.00	69.90	1.00	3510.46	1.99
3 Pt	552.46	12.80	7071.49	979.15	13.85	3510.46	27.89
4 Pt	552.46	12.00	6629.52	591.30	8.92	3510.46	16.84
Ocuje	552.46	47.60	26297.10	24.44	0.09	3510.46	0.70
Jagua	552.46	14.70	8121.16	31.62	0.39	3510.46	0.90
Yaba	552.46	15.70	8673.62	42.25	0.49	3510.46	1.20
almácigo	552.46	30.70	16960.52	256.15	1.51	3510.46	7.30
Macurije	552.46	48.20	26628.57	1299.30	4.88	3510.46	37.01
			117673.98	3510.46	2.98	3510.46	100.00

PACA = Precipitación a Cielo Abierto; EC = Esgurrimiento Cortical; ECT = Esgur. Cortical Total.

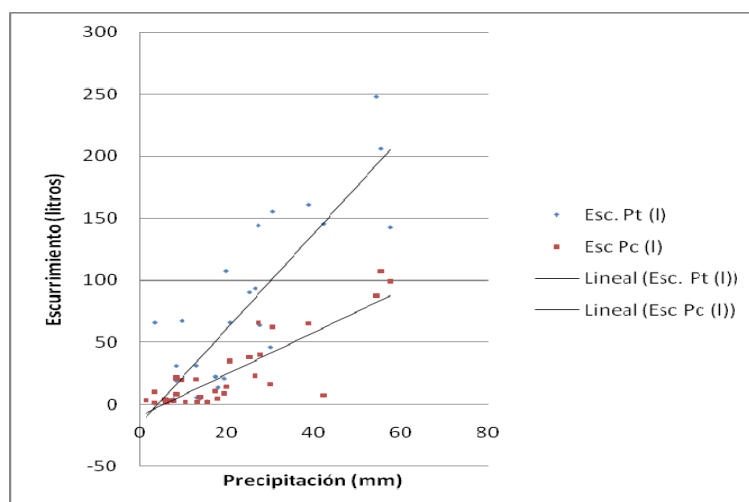
En el análisis de regresión donde se tiene en cuenta la precipitación total (Fig. 5.10 a), las ecuaciones tanto para *Pinus tropicalis* como para *Pinus caribaea*, manifiestan coeficientes de correlación aceptables (0.76 y 0.73 respectivamente), la pendiente del *Pinus tropicalis* (3.87), es más del doble que la del *Pinus caribaea* (1.69). No así los demás indicadores, como duración e intensidad, que no ejercen influencia significativa sobre el esgurrimiento cortical, según el análisis de regresión realizado (Figs. 5.10 b y 5.10 c), aunque se mantiene la tendencia a una mayor pendiente para *Pinus tropicalis*. En la misma figura 5.10 (latifolias) los mejores resultados relacionados con el coeficiente de correlación y la pendiente dependen de la cantidad de las precipitaciones y no de la duración e intensidad al igual que en las coníferas. Pero en este caso es el macurije el que sobresale respecto a las demás latifolias con un coeficiente de correlación de 0.779 y una pendiente de 3.778 muy superior a los demás. Recuérdese que este ejemplar fue capaz de escurrir por el fuste por año 1299.5 litros.

En general los valores más altos de pendientes se corresponden con los mayores valores de esgurrimiento cortical, esto tiene gran significado desde el punto de vista ecológico ya que le permite un mayor aprovechamiento de la lluvia caída, la cual al

escurrirse arrastra consigo las partículas depositadas en hojas, ramas y tronco conduciéndolas hacia las raíces.

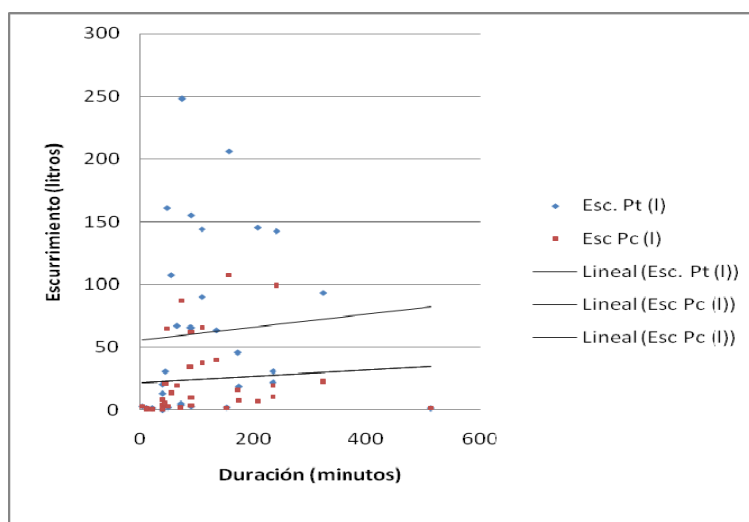
CONIFERAS:

a) Precipitación total.



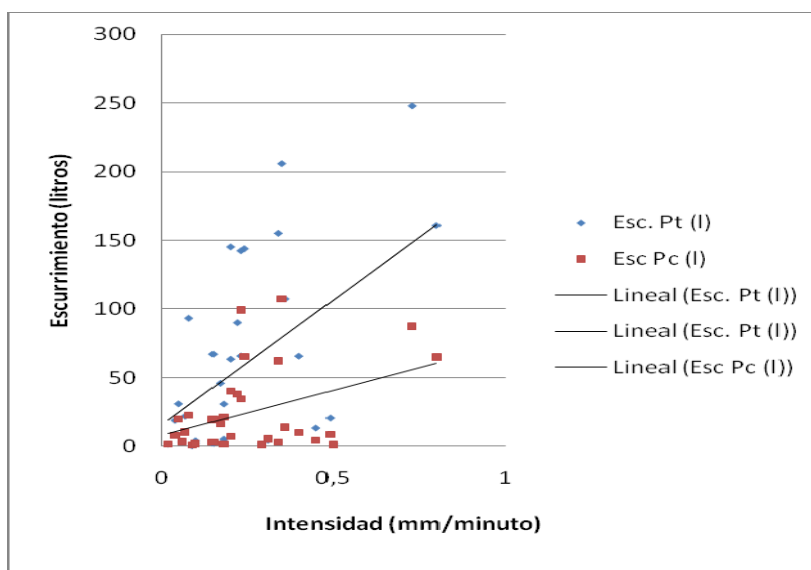
Especie	b ₁	b ₀	R ²	Sig.
<i>Pinus tropicalis</i>	3.87	-16.9	0.76	0.104
<i>Pinus caribaea</i>	1.69	-9.61	0.73	0.052

b) duración.



Especie	b ₁	b ₀	R ²	Sig.
<i>Pinus tropicalis</i>	0.052	55.3	0.006	0.006
<i>Pinus caribaea</i>	0.0261	21.5	0.008	0.015

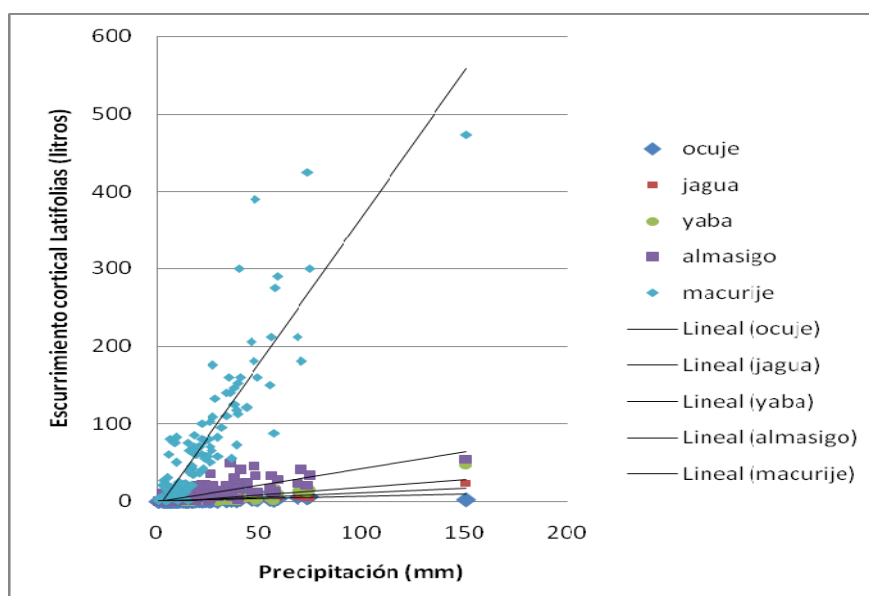
c) intensidad.



Especie	b ₁	b ₀	R ²	Sig.
<i>Pinus tropicalis</i>	182	15.4	0.25	0.402
<i>Pinus caribaea</i>	65.8	7.90	0.165	0.360

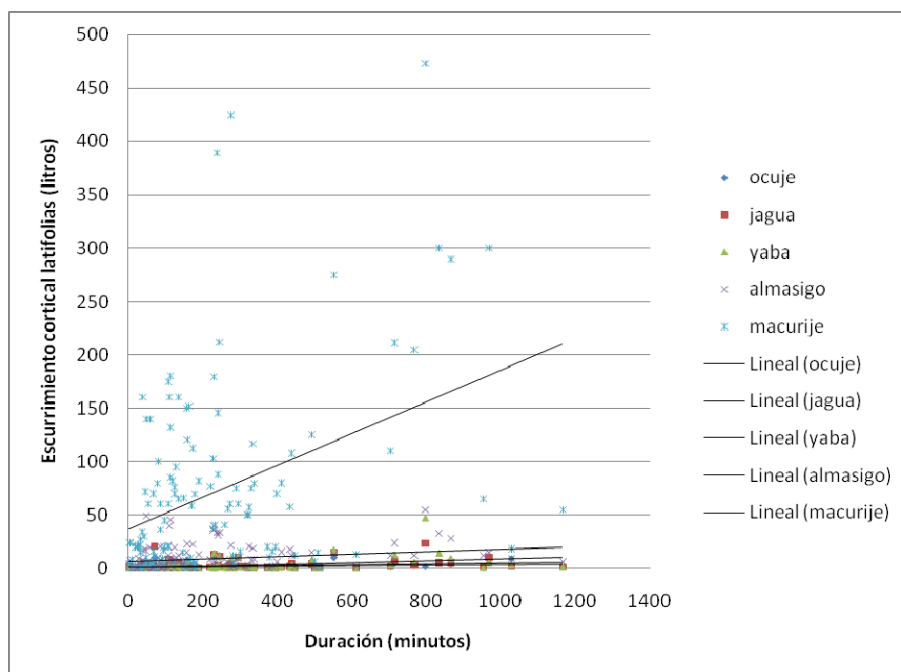
LATIFOLIAS

d) precipitación total



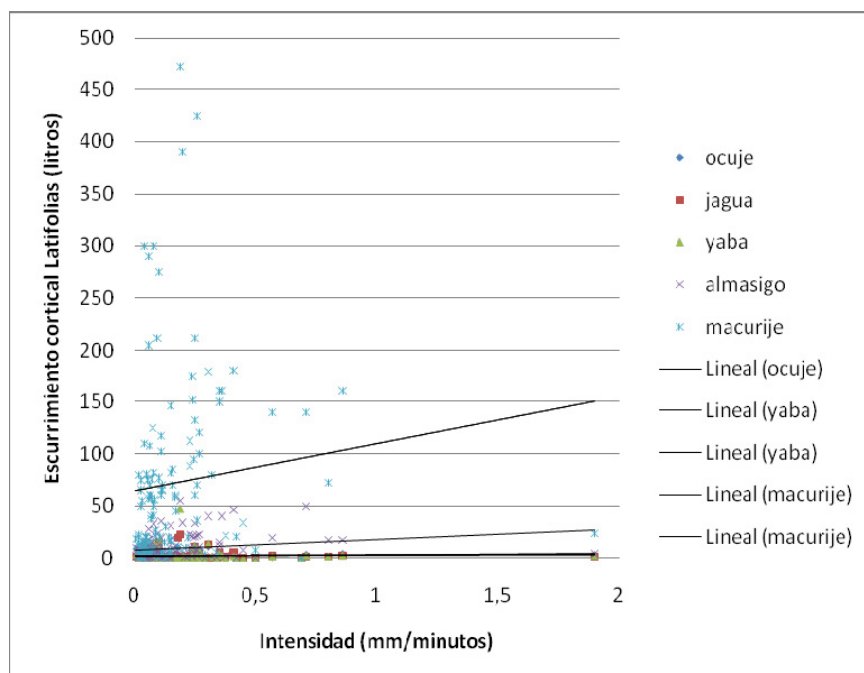
Especie	b ₁	b ₀	R ²	Sig.
<i>Matayba apetala</i>	3.778	-11.43	0.779	0.039
<i>Bursera simaruba</i>	0.427	-0.402	0.603	0.671
<i>Andira inermis</i>	0.204	-2.409	0.666	0.000
<i>Genipa americana</i>	0.115	-0.672	0.442	0.060
<i>Calophyllum pinetorum</i>	0.058	0.286	0.232	0,324

e) duración de precipitación



Especie	b ₁	b ₀	R ²	Sig.
<i>Mataiba apetala</i>	0.149	36.71	0.161	0.001
<i>Bursera simaruba</i>	0.011	6.23	0.061	0.000
<i>Geofrea inermis</i>	0.008	0.26	0.163	0.964
<i>Genipa americana</i>	0.004	0.834	0.086	0.058
<i>Calophyllum pinetorum</i>	0.003	0.889	0.075	0.004

f) intensidad.



Especie	b_1	b_0	R^2	Sig.
<i>Mataiba apetala</i>	45.26	64.18	0.013	0.000
<i>Burcera simaruba</i>	10.57	7.227	0.043	0.000
<i>Geofrea inerme</i>	0.72	1.979	0.001	0.001
<i>Genipa americana</i>	0.81	1.742	0.003	0.000
<i>Calophyllum pinetorum</i>	0.42	1.331	0.016	0.000

Figura 5.10. Análisis gráfico del escurrimiento (Esc.) por especies para precipitación total, duración e intensidad. Coníferas (a, b y c), Latifolias (d, e y f)

5.4.3. Comportamiento del escurrimiento cortical en periodo húmedo y seco según intervalos de precipitación.

En las figuras 5.11 a 5.14 se representa, para coníferas y latifolias (año 1983), el comportamiento del escurrimiento cortical frente a la precipitación a intervalos: (0 -10, 10,1-20, 20.1-30...). Como se observa a medida que aumenta la precipitación se incrementa el por ciento de escurrimiento y éste es menor en el periodo seco que en el húmedo, lo cual se puede atribuir fundamentalmente a la caída de las hojas de los árboles.

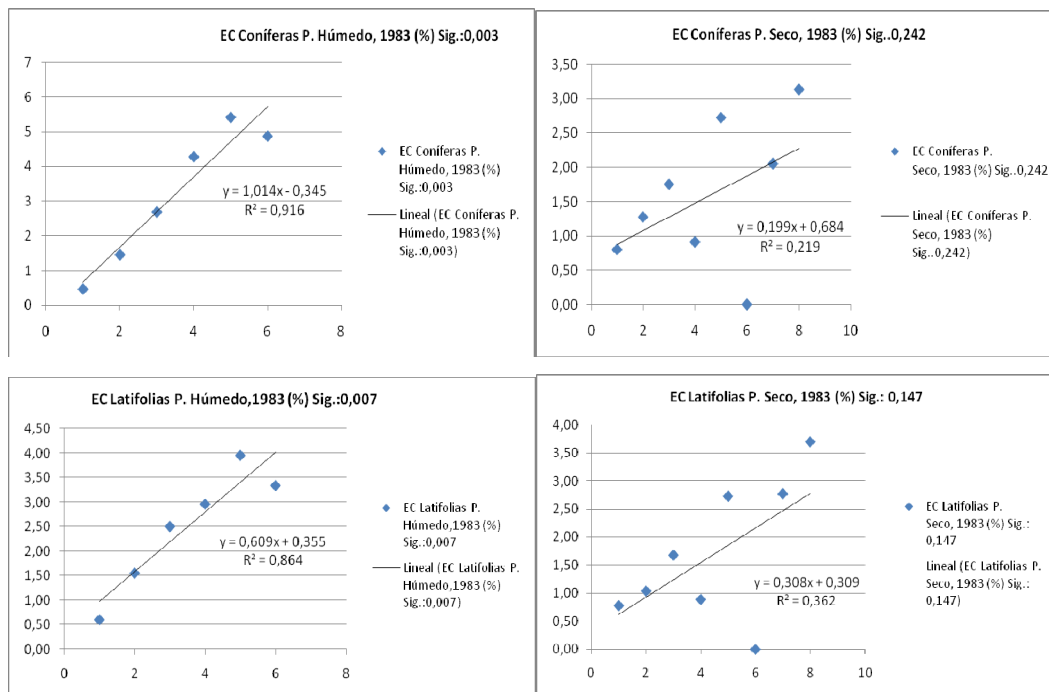


Figura 5.11 a 5.14. Comportamiento del escurrimiento cortical en coníferas y latifolias en período húmedo y seco en función de intervalos de precipitación.

5.5 Interceptación de las precipitaciones por las copas de los árboles.

En las investigaciones realizadas en la extinta URSS y otros países se determinó que la cantidad de las precipitaciones interceptadas por las copas de los árboles depende de la estructura y densidad de la vegetación, tipo de especie y de la cantidad e intensidad de las precipitaciones así como del intervalo entre las lluvias.

Molchanov (1961) apoyándose en muchas mediciones de interceptación de la lluvia por las copas de los árboles hechas en la extinta Unión Soviética y otros países de Europa llegó a la conclusión que los bosque de abetos pueden retener en sus copas el 37 – 46 % del total de la lluvia, las coníferas, en su conjunto, del 24 -27 %, las latifolias costeras el 24 % y los robles hasta el 22 %.

En Cuba estas investigaciones son escasas; las desarrolladas en Sierra del Rosario (1972) y posteriormente en la Estación Amistad a partir de su creación en 1978 y hasta la actualidad.

Karenski (1975) en bosques de latifolias secundarios, con densidad de 1.0, en la cuenca del río San Juan, Pinar del Río, determinó que estos pueden interceptar hasta el 27.4 % del total anual de la lluvia caída. En esta misma cuenca y vegetación Sagué

(1979) determinó que la evapotranspiración total podría llegar a ser de 51.9 % del total anual de lluvia caída. Estos resultados, y los obtenidos en numerosos trabajos, demuestran que la interceptación del agua por las copas de los árboles tiene un peso a considerar en el balance hídrico de las cuencas hidrográficas.

Según Huber e Iroume (2001) las pérdidas por Interceptación en las latifolias varían entre 204 y 1097 mm/año mientras que en las coníferas el rango de variación oscila solo entre 199 y 579 mm/año. Por otra parte Navar; Charles y Jurado (1999) en sus investigaciones determinaron valores de interceptación de 18.9 % en bosques de *Tamaulipan thornscrub* en el noroeste de México. Aboal, Jiménez, Morales y Hernandez (1999) determinaron valores de interceptación de un 30 %. Bellot y Escarre (1998) en bosque denso de rebrotes encontraron un 12.9 % de interceptación del agua caída. Xiao Dai *et al.* (2002) en bosque mixto de pinos y latifolias determinaron valores de interceptación de 23.4 %. Price y Carlyle (2003) en bosque mixto de latifolias y coníferas determinaron un 18.8 % de interceptación. Buvaneswaran, George y Mohan (2003) en una plantación de Teca de 30 años de edad y una densidad de 622 árboles/ha estimaron un 41.26 %.

Aussenac (1981) plantea el interrogante sobre si las cantidades interceptadas por la vegetación se han perdido para el sistema forestal. La experiencia aunque imprecisa, parece indicar que si. Rutter (1963) comprueba que la absorción foliar es insignificante y que las tasas de evaporación pueden justificar las pérdidas del agua interceptada por la evaporación.

Llorens y Domingo (2007) reseñan valores de interceptación para coníferas que oscilan entre 58.0 y 3.4 %, por ejemplo: *Pinus nigra* (58.0, 47.0 y 3.4), *Pinus sylvestris* (48.4, 26.1, 23.8, 16.5 y 8.5), *Pinus pinaster* (17.1), estas variaciones van acompañadas de diferencias en cuanto a localidad, densidad, edad, etc.

En la estación hidrológica Amistad las investigaciones sobre la interceptación de las precipitaciones por las copas de los árboles de coníferas y latifolias se efectuaron en las parcelas experimentales 1, 2 y 3 (Tabla 5 y 6 de los anexos) las observaciones realizadas durante los años 1982-1985 (Tabla 6 a, anexos), demostraron que el por

ciento de la interceptación de las lluvias por las copas de los árboles varia por años y por meses dependiendo de la cantidad e intensidad de las precipitaciones. En los bosques de la Estación, en las coníferas el promedio de interceptación fue de 17 % y en los de latifolias del 24.9 %, este último resultado está muy cercano al dado por Bruijnzeel y Critchley (1994) y Fossbender (1993) de un 25 % en bosques latifolios húmedos tropicales (Figura 5.15 y 5.16) .Como promedio anual, las copas de latifolias interceptaron 422 mm y las de coníferas 312 mm.

El bosque de latifolia posee una densidad del dosel de 1, lo que explica la mayor cantidad de lluvias interceptadas por sus copas ya que los bosques de coníferas tienen una densidad de 0.7.

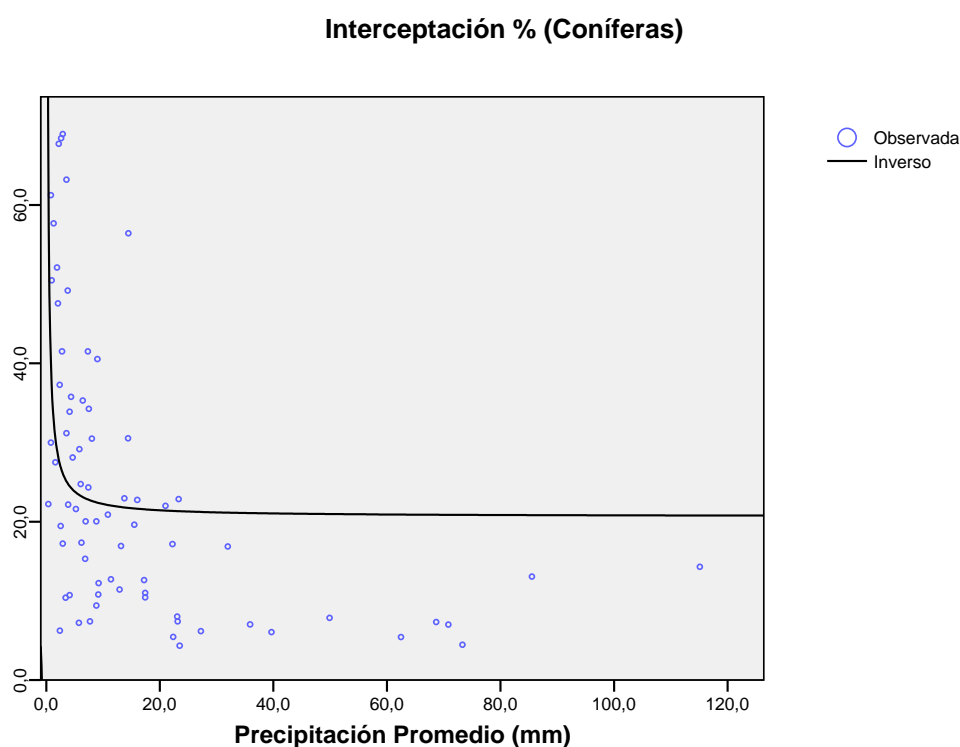


Figura 5,15. Representación de la interceptación en % respecto a la precipitación en la estación hidrológica Amistad en coníferas.

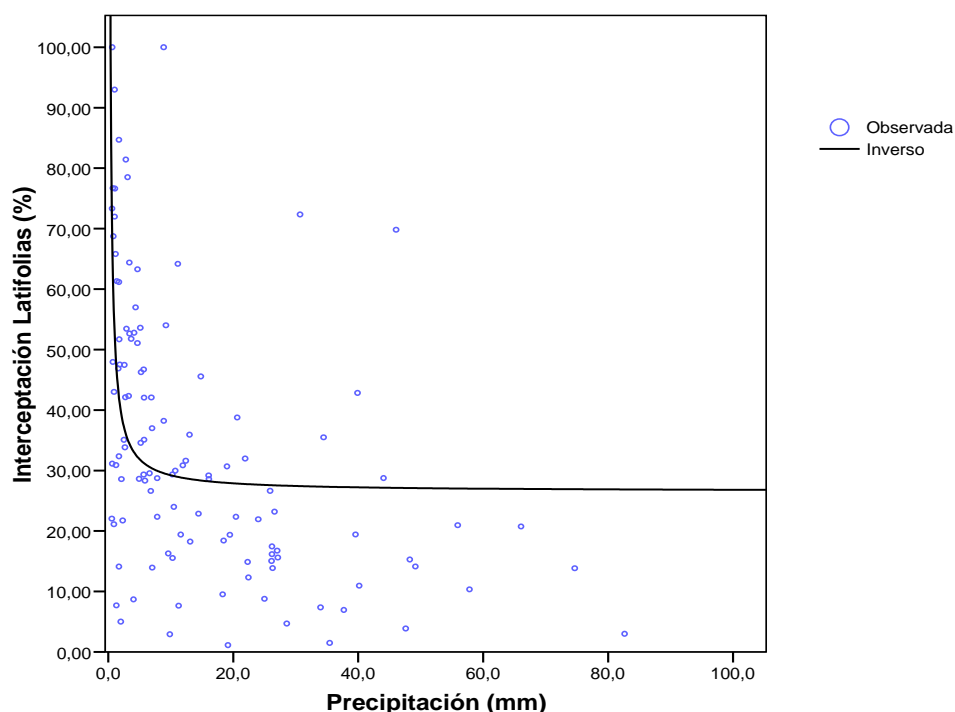


Figura 5.16. Representación de la interceptación en % respecto a la precipitación en la estación hidrológica Amistad en latifolias.

5.5.1. Comportamiento de interceptación en período húmedo y seco para intervalos de precipitación.

De las precipitaciones analizadas en 1982 (tabla 5.6) dentro del intervalo (0-10 mm), diecinueve (19) de ellas fueron interceptadas al 100 %. Los resultados mostrados en la tabla confirman que a medida que aumenta la cantidad de precipitación, el por ciento de interceptación disminuye ya que una vez saturado el dosel comienza la trascolación y el escurrimiento.

Tabla 5.6. Interceptación (conífera y latifolia), periodo seco y húmedo según intervalos de precipitación a cielo abierto.

Especie	Periodo	% de interceptación para intervalos		
		0-10	10.1-20	>20.1mm
Conífera	Seco	11	10	7
Conífera	Húmedo	29	33	10
Latifolia	Seco	29	28	17
Latifolia	Húmedo	47	30	19

Como se observa en la tabla tanto las coníferas como las latifolias en todos los tipos de intervalos los por cientos de interceptación son menores en los periodos seco que en los húmedos, este es el caso inverso a lo que sucedió con la trascolación, ya que en el periodo seco hay menos follaje.

5.6. Conclusiones:

- Para el análisis de los flujos hidrológicos se tuvieron en cuenta 308 de los 326 eventos de precipitación registrados en el periodo de estudio (1982-1984), se aprecia una alta variabilidad, lógica para el fenómeno estudiado, los principales resultados son: Trascolación (81.19 % en coníferas y 73.44 en latifolias), Esguerrimiento cortical (1.81 % en coníferas y 1.67 % en latifolias) e Interceptación (17% en coníferas y 24.89 % en latifolias). Se comprobó que la trascolación aumenta en la medida que aumenta la precipitación y tiende a ser mayor en el periodo seco producto de la pérdida de follaje, en el caso del esguerrimiento ocurre algo similar sólo que en el periodo seco es menor, en el caso de la interceptación ocurre lo contrario a la trascolación .
- Las regresiones lineales entre la precipitación a cielo abierto y el volumen de agua colectado por cada pluviómetro, tanto para coníferas como latifolias, son muy significativas y los valores de las pendientes también difieren significativamente entre una especie y otra lo que demuestra la mayor

trascolación en el caso de las coníferas. Además para el caso de las coníferas se comprobó que el coeficiente de variación entre pluviómetros para un mismo evento es mucho mayor y variable para precipitaciones inferiores a aproximadamente 10 mm, valor a partir del cual disminuye y se estabiliza.

- La variable precipitación es la que guarda una relación más estrecha con los flujos hidrológicos, más acentuada en el caso de la trascolación, por ello a partir de los datos generales se obtuvieron sendos modelos para estimar la trascolación en coníferas y latifolias a partir de la precipitación a cielo abierto. Además para el caso de *P. tropicalis* y *P. caribaea* se obtuvieron modelos para estimar el escurrimiento cortical a partir de la precipitación.
- A partir de una amplia revisión bibliográfica se comprobó que los resultados obtenidos en el presente trabajo se corresponden con los reportados internacionalmente.
- Para el conjunto total de datos, los resultados estadísticos demuestran la existencia de diferencia altamente significativa para la trascolación y la interceptación entre coníferas y latifolias, no siendo igual para el escurrimiento. En el caso particular del escurrimiento para *P. tropicalis* y *P. caribaea* se confirmó la hipótesis de que en Pt es mayor el escurrimiento y la diferencia es altamente significativa lo que permite asegurar que este es uno de los factores por lo cual esta especie ofrece gran resistencia a las condiciones de bajo nivel de humedad del suelo.

CAPÍTULO 6.- PARTICIÓN DE LA PRECIPITACIÓN ENTRE ESCURRIMIENTO Y EVAPOTRANSPIRACIÓN

6.1.- Introducción

La forma en que la lluvia caída sobre una cuenca hidrológica se reparte entre escurrimiento y evapotranspiración es un aspecto de vital importancia para la estima de los recursos hídricos. A nivel planetario se calcula que el 36 % de la precipitación que incide sobre el área continental se convierte en escurrimiento mientras que el 64 % restante vuelve a la atmósfera como evapotranspiración (Schlesinger, 2000). Si bien aspectos de las cuencas como la topografía, las características del suelo y la roca madre tienen una marcada influencia en la generación del escurrimiento, en este capítulo se va a insistir especialmente en el papel determinante de la interacción entre el clima y la vegetación en la producción de la mayor parte del flujo de evapotranspiración.

Los objetivos del presente capítulo son los que a continuación se indican:

- 1) Caracterizar la capacidad de infiltración de los suelos más representativos de la cuenca del río San Diego y la generación de escurrimiento por medio de simuladores de lluvia en parcelas de 100 m².
- 2) Diferenciar y cuantificar los flujos de escurrimiento superficial y profundo en una serie de cuatro parcelas de 300 m² de superficie, por la importancia que tienen para los procesos erosivos que se tratan en el capítulo 9.
- 3) Valorar la diferencia en la partición de la precipitación entre escurrimiento y evapotranspiración de los eventos extraordinarios, como el ciclón Alberto, en relación con las condiciones climatológicas normales.
- 4) Caracterizar el funcionamiento hidrológico de las cuatro subcuencas aforadas de la estación Amistad, estimando el flujo de evapotranspiración, y con el posterior análisis de las relaciones de la precipitación (P) con escurrimiento

(Q) y la evapotranspiración (ETR), tanto en el conjunto del año hidrológico como en las épocas húmeda y seca.

- 5) Utilizar el modelo general de Piñol *et al.*,(1999) que combina las variables P,Q y ETR junto a la evapotranspiración potencial, para hacer predicciones sobre el futuro comportamiento del escurrimiento de las microcuencas en alguno de los escenarios de cambio climático previstos para Cuba.

Las principales hipótesis, en relación con los objetivos mencionados, son las siguientes:

- 1) En las áreas taladas, no sometidas a ninguna gestión inmediata de remediación, y que sufren de compactación, disminuye la permeabilidad de los suelos y por consiguiente se incrementa el escurrimiento.
- 2) La mayor proporción del escurrimiento en los suelos forestales, cuando las condiciones no son de saturación, circula por la vía profunda, pero el cambio tras la tala y posterior uso agrícola puede incrementar considerablemente el flujo de escurrimiento superficial.
- 3) Los coeficientes de escurrimiento y evapotranspiración (normalmente alrededor de 0.30 y 0.70) pueden invertir su magnitud cuando se producen eventos extraordinarios como es el caso del ciclón Alberto.
- 4) Las cuatro subcuencas tienen un funcionamiento hidrológico similar, con algunas diferencias que se analizan con más profundidad en el capítulo 10 y en todas ellas P es una buena variable para predecir Q, tanto con datos de todo el año como de la época lluviosa, pero las predicciones en época seca son algo peores.
- 5) En el escenario previsto de cambios climático para Cuba es de espera que el comportamiento hidrológico de estas áreas de la Amistad tienda a tener una mayor similitud con el modelo mediterráneo al disminuir la disponibilidad de agua, dado principalmente por los periodos secos que cada vez se intensifican más.

6.2 Escurrimiento líquido en pinares naturales (parcelas de escurrimiento temporal, parcelas de balance hídrico, eventos meteorológicos y en subcuencas)

En las investigaciones hidrológicas forestales en la cuenca del río San Diego a partir de 1974 han transcurrido tres etapas:

- 1- Trazado de perfiles transversales a través de los afluentes principales para determinar la caracterización de la vegetación, pendiente, suelo y distancia al primer parte agua, en el período, (1974 - 1975).
- 2- Investigaciones a través de parcelas con lluvia artificial, en distinto tipos de vegetación, pendiente, suelo e intensidad de las precipitaciones, así como la velocidad de infiltración, lo que junto con la primera etapa permitió determinar, una vez procesada la información, el ancho de las fajas forestales hidrorreguladoras, todo ello en el período, (1975 -1976).
- 3- Investigaciones realizadas del balance hídrico con lluvia natural, en la Estación Hidrológica Forestal Amistad, en subcuencas y parcelas en el período, (1979 hasta la actualidad). Las mismas se ejecutaron con los proyectos 1) Influencia del bosque en el régimen hidrológico y 2) Definición de las afectaciones que sobre el rendimiento hídrico, la erosión y la calidad del agua ejercen los distintos tipos de tala y los cultivos agrícolas anuales.

6.2.1 Parcelas de escurrimiento temporal

En la segunda etapa se eligieron 80 parcelas, todas ellas tratadas con lluvia artificial, de las cuales siete se ubicaban dentro del macizo forestal de Galalón. Los resultados obtenidos en las parcelas 101 y 102, demostraron que la permeabilidad del suelo en el área talada en comparación con los suelos bajo el bosque, disminuyó de 2 - 3 veces, lo que provoca un escurrimiento superficial y una erosión en el lugar talado después de caer una lluvia con intensidad de 1 mm/min, así como un aumento del coeficiente de escurrimiento de 5 - 6 veces. Esta respuesta está relacionada con la compactación de los horizontes superiores del suelo, por los procesos que tienen lugar durante la extracción de la madera. Como consecuencia, el impacto de las gotas de lluvia que al caer en la superficie carente de vegetación destruyen la estructura del suelo,

obstruyendo los poros. Todo parece indicar que la tala rasa, sin ningún tipo de gestión de remediación inmediata, produce una disminución de las propiedades reguladoras y protectoras del bosque. Resultados similares obtuvieron Herrero y Melchanov. (1981) en una cuenca de la provincia oriental, la del río Cauto.

En la parcela 107, se puso de manifiesto el peligro de utilizar las áreas forestales con pendientes iguales o mayores a 12 grados para uso de cultivos agrícolas, ya que aumenta de forma considerable el volumen de escurrimiento y al mismo tiempo se observa una erosión muy intensa.

De forma general se cumple que la permeabilidad de los suelos en los bosques de latifolias con valor de 3.4 mm/mim, es mayor en 1,5 veces que la obtenida en los bosques de coníferas. Esto se explica por el efecto de compactación de los suelos ejercido por la vegetación herbácea que crece bajo el dosel del bosque de pinos de baja densidad.

A consecuencia del rápido desarrollo de las especies maderables en condiciones de clima tropical, las propiedades protectoras y reguladoras de los suelos forestales se restablecen rápidamente. Los bosques jóvenes de coníferas (10 años de edad), se aproximan al de los bosques maduros, según investigaciones realizadas por Herrero y Melchanov (1981) y Melchanov *et al.* (1990).

6.2.2. Distribución en las parcelas de balance hídrico en el flujo superficial y subterráneo (lluvia natural)

Estas parcelas (1 y 2; 3 y 4), comenzaron a funcionar en el año 1981 y para su análisis se dividen en dos períodos. El primero, antes de la tala, 1981 - 1985 y el segundo, después de la tala, 1986 – 1989, dividiendo el volumen que corresponde al escurrimiento superficial y al subterráneo. Hasta el año 1986, las parcelas de balance hídrico ubicadas en las partes más bajas de la ladera, estaban cubiertas de bosque y como especie predominante el *Pinus caribaea* (Tabla 6.1) lo que se corroboró con un

inventario realizado, donde la mayor existencia de madera, correspondió a las coníferas que ocupan entre el 80 y 90 % del volumen total (Tabla 6.2).

Los resultados de la investigación del bosque natural, período 1981 - 1985 (Tabla 6.3) demostraron que aunque las parejas de parcelas 1 - 2 y 3 - 4 se encuentran próximas, los índices de escurrimiento son diferentes, por lo tanto es necesario que las investigaciones se realicen comparando los datos antes y después de la tala en cada parcela y no con el patrón. Hay que tener en cuenta entre los dos períodos dos indicadores o factores, el primero esta dado por un aumento en todas las parcelas debido a que en el segundo período cayeron 100 mm más que en el primero y el otro, la acción del hombre. Las investigaciones de la influencia de la actividad económica del hombre demostraron que la tala del bosque en la parcela 2 con la posterior plantación no ejerció una influencia considerable sobre la erosión del suelo, sin embargo el volumen total del escurrimiento aumento en 2,4 veces. El volumen del escurrimiento se explica entre otros por la reducción de la humedad consumida en la transpiración del bosque. Condicionado al aumento de la capacidad de infiltración por el efecto de drenaje de las raíces, por la presencia de hojarasca forestal y por el mejoramiento de la estructura del suelo, ello se explica con los resultados de la tabla 6.3, donde el escurrimiento subterráneo fluctúa entre 217 - 532 mm, mientras que el escurrimiento, total lo hace entre 260 - 590 mm de lámina de escurrimiento, debido a que entre el 80 y el 90 % de la lluvias dentro del bosque se convierten en agua subterránea. El mayor volumen de escurrimiento superficial se registró en la parcela cuatro el cual fue de un 93 mm (21,9 %) en el primer período (Tabla 6.3).

Tabla 6.1 Características de la parcelas de balance hídrico.

No de la parcela	Tipo	Ubicación	Ancho (m)	Largo (m)	Área (m²)	Pendiente	Suelo	Método de medición del gasto
1 - 2	parcelas permanentes delimitadas por un muro de hormigón	parte inferior de la ladera occidental	10	30	300	12	Ferralítico Cuarzítico Amarillo Rójizo Lixiviado	Volumétrico y limnigrafos.
3 - 4	Iden.	parte inferior de la ladera oriental	10	30	300	17	Iden.	Iden.

Tabla 6.2 Volumen de madera (m³/ha), en las parcelas de balance hídrico.

No de parcelas	Superficie (ha)	Pinos			Latifolias			Total		
		Cantidad de árboles por (ha)	m³/ha	Volumen pro/árbol m³	Cantidad de árboles por (ha)	m³/ha	Volumen pro/árbol m³	Cantidad de árboles por (ha)	m³/ha	Volumen total por parcela (m³)
1	0,03	632	264	0,46	133	1,0	0,01	865	265,0	8,0
2	0,03	700	230	0,33	200	4,70	0,02	900	234,0	7,0
3	0,03	732	190	0,26	165	1,00	0,01	897	190,0	5,7
4	0,03	433	170	0,39	133	7,30	0,02	866	177,3	5,3
Media	0,03	624	213	0,36	631	3,5	0,015	882	216	26

Para tener una idea de las funciones hidrorreguladoras y antierosivas del bosque (Tabla 6.3) se efectuó en la parcela 3, la conversión del bosque en cultivos agrícolas, lo que contribuyó al aumento brusco del volumen del escurrimiento y la erosión del suelo; la lámina media del período antes de la tala fue de 562 mm, para un escurrimiento superficial de 9,2 % (90,8 % subterráneo), una vez sometida a una tala total el escurrimiento promedio para dicho período (1986 - 1989) fue 1081 mm (30 % superficial), pero como se puede observar como promedio para dicho período la erosión se elevó a 1306,3 kg ha⁻¹año⁻¹, estando por encima de la erosión promedio del control en 13,8 veces y llegando dicha parcela al cuarto año (1989) de estar sometidas a cultivos anuales a 3640 kg ha⁻¹año⁻¹. Estos datos atestiguan que el uso de las áreas forestales con pendientes de 12 grados o más en la agricultura contribuye a la aparición de una erosión catastrófica en el suelo. Al comparar los terrenos forestales con los agrícolas se observa que los bosques disminuyen el escurrimiento superficial y lo convierten en subterráneo, asegurando de esta manera el suministro regular de agua a las fuentes, disminuyendo las crecidas y evitando el surgimiento de la erosión de los suelos; todo esto confirma que el bosque es el regulador de las aguas. Bajo la influencia de la vegetación forestal, cambian considerablemente las propiedades hidro - físicas de los suelos, lo que nos permite concluir que debemos pensar en manejos adecuados y aplicar técnicas silvícolas tales como talas selectivas, talas conservando el bosque de galería, tratamientos moderados que permitan balancear las cuencas hidrográficas teniendo en cuenta un desarrollo forestal sostenible.

Tabla 6.3 Escorrimento y erosión en las parcelas de balance hídrico de la Estación “Amistad”

No de parcela	Coeficiente de escurrimiento total	ESCURRIMIENTO						
		TOTAL	SUPERFICIAL			SUBTE-RRÁNEO	SÓLIDO	
		mm	mm	K	%	mm	Mg l ⁻¹	Kg ha ⁻¹
		PROMEDIO ANTES DE LA TALA 1981 – 1985 (PRECIPITACIONES 1698 mm)						
1	0,35	590	58	0,03	9,8	532		
2	0,15	260	42	0,02	16,0	217		
3	0,33	562	52	0,03	9,2	510		
4	0,25	425	93	0,05	21,9	332		
PROMEDIO DESPUÉS DE LA TALA 1986 – 1989 (PRECIPITACIONES 1798 mm)								
1	0,57	1030	117	0,07	11,4	913	136,9	33,5
2	0,35	625	75	0,04	12	550	178,6	42,5
3	0,60	1081	324	0,18	30,0	757	4028,0	1306,3
4	0,33	588	116	0,06	19,7	472	535,4	94,5

6.2.3. Eventos meteorológicos excepcionales y su relación con el escurrimiento.

Se pretende en este apartado analizar el ciclón Alberto y su influencia en la alteración en algunos indicadores del escurrimiento hídrico en áreas de pinares naturales de las Alturas de Pizarras en la Estación Hidrológica Amistad. Para ello se hace un análisis del comportamiento de los diferentes indicadores hidrometeorológicos en la subcuenca 2 con bosque natural, se tuvo en cuenta un período antes del ciclón (1979 - 1981) y un período después del mismo (1983 - 1989) y el período general (1979 - 2003), así como el comportamiento del año 1982 cuando ocurrió este fenómeno atmosférico, además se hace un análisis del mes de junio de este año y dentro de este mes, en el que ocurrió dicho ciclón, se analizaron los 4 principales días de dicho evento (Tabla 6.4), Es bueno señalar que este ciclón no se caracterizó por la intensidad de sus vientos, en este caso en el área de la estación, su velocidad sólo llegó a 72 Km/hora. Este fenómeno se caracterizó por la duración, frecuencia e intensidad de las precipitaciones; en el mes anterior al ciclón cayeron 249,3 mm de agua, pero de éstos 212,3 mm (85%) precipitaron de forma consecutiva durante 13 días (19 - 31 mayo), luego en los 4 días principales (del 1 al 4 junio) con 387 mm, continuando hasta el día 9 de este mes, en síntesis estuvo lloviendo durante 22 días consecutivos. Las intensidades fueron presentándose desde 0,04 mm/min, pasando por muchas variaciones hasta llegar a la máxima absoluta durante 10 minutos registrada de 7:20 a 7:30 am del día 3 de junio de 1982 que fue de 3 mm/min.

El promedio de las precipitaciones del período antes y después del ciclón son bastantes similares (1768 y 1758). Al paso del ciclón esta cifra se elevó a 2155 mm estando clasificado dentro de los años muy lluviosos, es de destacar que solo en el mes de junio cayeron 778 mm o sea 36 % de ese año y el 44 % de la media de ambos períodos (antes y después del ciclón). Los 387 mm que cayeron en los 4 días principales del ciclón constituyeron el 48 % del mes (778 mm destacándose el día 3 con 160 mm).

La lámina de escurrimiento del año 1982 estuvo muy por encima de ambos períodos,(antes y después del ciclón) ya que en estos, según la subcuenca 2 estuvo en el rango entre 487 y 593 mm, mientras que en este año 82 fue de 930 mm o sea que hubo una relación de lo que escurrió con lo que precipitó en el caso de los dos períodos fue de un 28 – 33 %, mientras que en este año 82 fue de un 43 %, Teniendo en cuenta, que en el mes de junio con 778 mm de precipitaciones y la lámina que llegó a ser de 621 mm, para un coeficiente de escurrimiento de 0,80, o sea que escurrió el 80 %, y alrededor de 22 días con lluvias consecutivas (Tabla 6.4), el suelo estaba prácticamente saturado. Igualmente en los 4 días más significativos de este evento con una lámina de 338 mm para un coeficiente de escurrimiento de 0,87, destacándose el día 3 (día del ciclón), donde llegó a escurrir el 95 % ya, entre otras causas el suelo se encontraba casi al límite de su capacidad de absorber agua. En el caso del módulo de escurrimiento que durante los períodos anteriores y posteriores del ciclón fue de 0,16 - 0,18 l seg⁻¹ha, llegando en el año del ciclón a 0,29 y en el mes de dicho evento a 2,39 así como llegó a ser de 17,6 en el día 3.

Tabla 6.4 Principales indicadores hidrometeorológicos durante, antes y después del ciclón Alberto (junio 1982), en bosques naturales de coníferas.

Fecha	Lluvia (mm)	subcuenca 2 (Testigo)		
		Lámina (mm)	Modulo, (l seg ⁻¹ ha ⁻¹)	Coeficiente, Esgurrimiento,
Ante del ciclón (1979-1981)	1768	593	0,18	0,33
Año del ciclón (1982)	2155	930	0,29	0,43
Después ciclón (1983-1989)	1758	487	0,16	0,28
Período comp,(1979-2003)	1860	538	0,17	0,29
junio 1982 (mes del ciclón)	778	621	2,39	0,80
Días del ciclón: 1-6-82	56	33	3,77	0,59
2-6-82	91	80	9,22	0,88
3-6-82	160	153	17,69	0,95
4-6-82	80	72	8,29	0,90
4 días durante el ciclón	387	338	9,74	0,87

Como se había dicho y según se observa en esta tabla en el período 1979 - 2003 donde el promedio de precipitación fue 1860 mm, escurriendo una lámina de 538 mm, para un coeficiente de escurrimiento 0,29, correspondiendo una evapotranspiración del 71 %, En dicha tabla como se puede observar durante el mes del ciclón Alberto según valores de precipitación y escurrimiento el coeficiente de escurrimiento como promedio para el mes de junio fue 0,80, ocurriendo un valor mínimo en la evapotranspiración de un 20 %, Todo esto indica que cuando hay muchos días consecutivos de lluvia y suelos con gran contenido de agua, la demanda evaporimétrica es mínima.

6.2.4. Análisis de los escurrimientos (subcuenca 1, 2, 3 y 4).

En la formación del escurrimientos juega un papel decisivo la intensidad, frecuencia y cantidad de lluvia; aunque en su distribución dentro del año no menos importancia tiene la distribución estacional de las precipitaciones y la actividad económica del hombre en la cuenca colectora, las que juntas con las condiciones edáficas, de boscosidad y parámetros físicos de las cuencas, determinan la magnitud anual del escurrimiento.

Los resultados de las investigaciones período (1979 - 2003), sobre los indicadores principales del escurrimiento en el pinar natural, presentan un valor de 538 mm de lámina de escurrimiento, un módulo de $0,17 \text{ l seg}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ y un coeficiente de escurrimiento de 0,28, comportándose proporcionalmente a los valores de la lluvia promedio anual Tabla 6.5 (anexos).

Es interesante también destacar el hecho de que los aguaceros de 40 mm que son los que forman las grandes avenidas, constituyeron el 3,76 % en 1979; 7,64 % en 1982 y 4,23 en 1983, representando el 36,50; el 39,55 y el 31,13 % del total de agua recibida por la cuenca en los respectivos años. Esos valores tan elevados se explican fundamentalmente por el paso de ciclones, perturbaciones y frentes fríos, en la provincia, como por ejemplo el ciclón Alberto, ocurrido en Junio de 1982 y los frentes fríos de enero - marzo de 1983.

En el caso de las diferentes microcuencas, la cantidad de precipitación fue del mismo orden. En dicho período la precipitación fue del orden 1880 mm, en el caso del período húmedo precipitó un 72 % mientras que en el seco fue de un 28%.

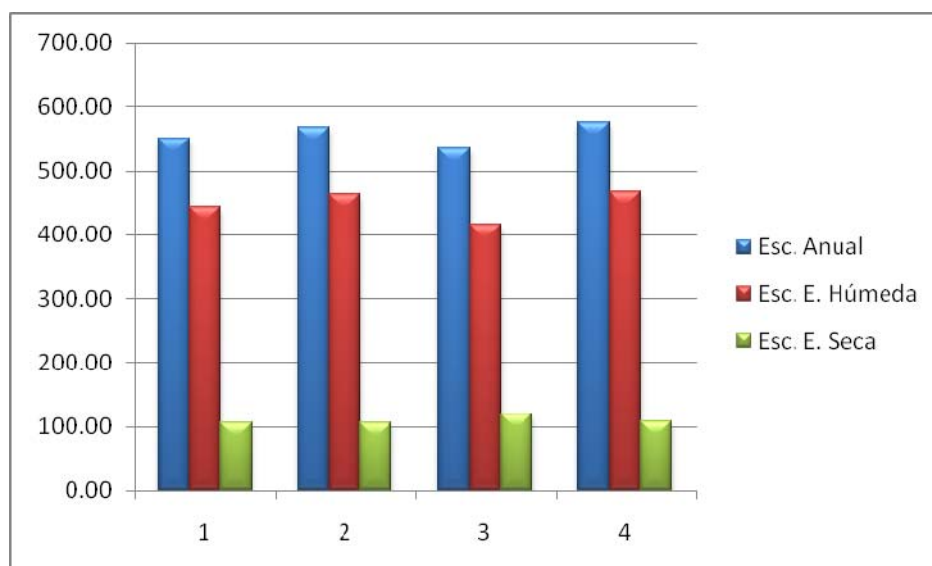


Figura 6.1 Valores de escurrimiento (mm) totales, por épocas y subcuencas del área de estudio para el período hidrológico 1979 al 2001.

Respecto al escurrimiento total y por época (Figura 6.1), las subcuencas 1, 2 y 4; se comportaron bastante semejantes, no así la 3, que presenta valores ligeramente más altos, debido a que se efectuó una tala total, que también provocó, durante los primeros años disminución de la evapotranspiración y un aumento del rendimiento hídrico. En esta misma subcuenca a los 15 años, se le efectuó un tratamiento silvicultural, resultando que un año después, la lámina de escurrimiento se incrementó hasta 158 mm, como efecto también de la disminución de la evapotranspiración. Resultados similares obtuvieron Renda *et al.* (2003). Esta diferencia se observa con mayor magnitud en el período seco, ya que mientras que en las subcuencas 1, 2 y 4 es del orden del 19,4%, 18,6% y 18,8% respectivamente, en la subcuenca 3 es 23,1% (Figura 6.1).

El trabajo de Likens *et al.* (1977) muestra la existencia de una clara dependencia estadística entre la precipitación (P) y el escurrimiento (Q) en el conjunto de cuencas

experimentales de Hubbard Brook. En la figura 6.2 (Morejón 2009) aparece la buena correlación existente entre esas dos mismas variables, pero en diferentes estaciones de un amplio rango del volumen de la lluvia anual. En esta gráfica se han incluido los catorce bosques tropicales con datos de balances hidrológicos recopilados por Richards (1996), la última cuenca de las que aparecen en la relación de Bosch y Hewlett (1982), ubicada en el SW de Washington, y las cuatro cuencas en las que se basa el presente estudio, En la lista de cuencas de países tropicales de Richards (1996) los coeficientes de escurrimiento oscilan de forma considerable, entre un máximo de 0,80 del estudio de Ledger (1975) en una zona extraordinariamente lluviosa de Sierra Leona y un mínimo del 0,19 para un dato de Leopoldo (1982) en el Amazonia, en un lugar con la lluvia anual ligeramente superior a los 2000 mm. El valor medio del coeficiente de escurrimiento de los catorce valores es 0,53, claramente superior, como es de esperar en los trópicos lluviosos, al 0,36 que estima Schlesinger (2000) para el conjunto del área continental del planeta,

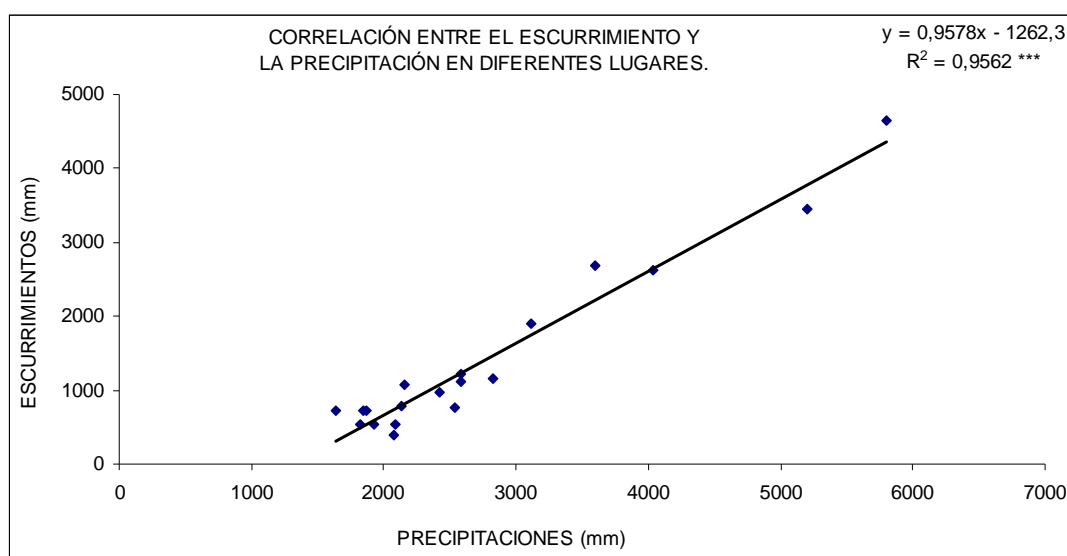


Figura 6.2 Relación entre los escurrimientos y la precipitación en diferentes lugares del mundo.

En el caso concreto de pinares, el coeficiente de escurrimiento estimado por Meng Guang (2001) en *Pinus armandii* en bosques de China fue 0,17 con una lluvia anual de

1000 mm, mientras que en las cuencas de *Pinus ponderosa* de Arizona recopiladas por Bosch y Hewlett (1982) los valores oscilaron entre 0,10 y 0,26 para un rango de precipitación entre 580 y 815 mm al año, todos ellos inferiores a los promedios encontrados para el período de estudio en Amistad (0,28).

Ya se ha indicado que tanto para diferentes años de seguimiento de un bosque templado húmedo (Likens *et al.*, 1977) como para una serie de diferentes estaciones en un amplio rango de precipitación (Figura 6.2) se obtienen muy buenas correlaciones lineales entre los valores de P y Q anuales. Se trata ahora de caracterizar esta misma relación de variables en las cuatro cuencas estudiadas, pero no solo con los valores de los años hidrológicos, sino también con los correspondientes a las épocas seca y lluviosa. En las Figuras 6.2 a 6.13 aparecen las regresiones lineales entre P y Q para los años hidrológicos completos (P_A y Q_A) y para las épocas lluviosa y seca en las cuatro subcuencas que se investigan (con P_H y Q_H precipitación y escurrimiento para la época lluviosa, y P_S y Q_S para la época seca). De lo que aparece en esa serie de figuras se puede concluir lo siguiente:

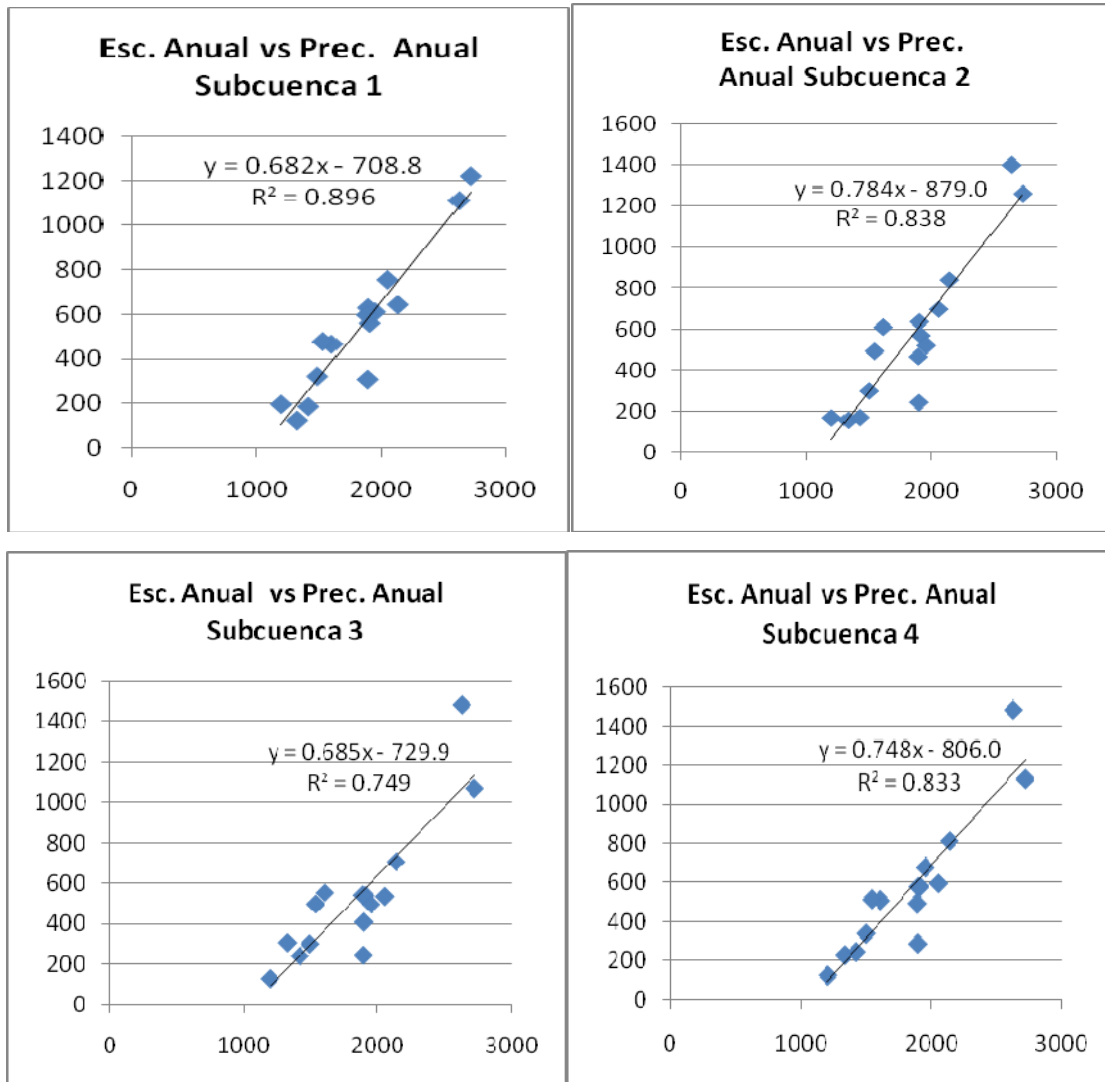
Las mejores regresiones lineales con los mayores coeficientes de determinación son las correspondientes a la época húmeda y al período anual total y en todos los casos con un nivel de significación de $p < 0,001$.

- En todos estos casos se puede decir que P es una buena variable para predecir Q, y que en los períodos hidrológicos considerados en conjunto (todo el año o los seis meses de lluvia) no parece haber demandas de recursos hídricos por parte del bosque, que no puedan ser satisfechas,
- Para los valores de P y Q en la época de sequía, los modelos lineales no resultan tan satisfactorios.
- Si como ya se ha señalado en estos seis meses de sequía estas cuencas reciben solo entre el 28% de la lluvia del año pero los bosques que las cubren tienen una demanda evaporativa del 45 % de la total del año, es normal que la competencia entre el flujo de avenamiento y el transpiratorio que requiere el

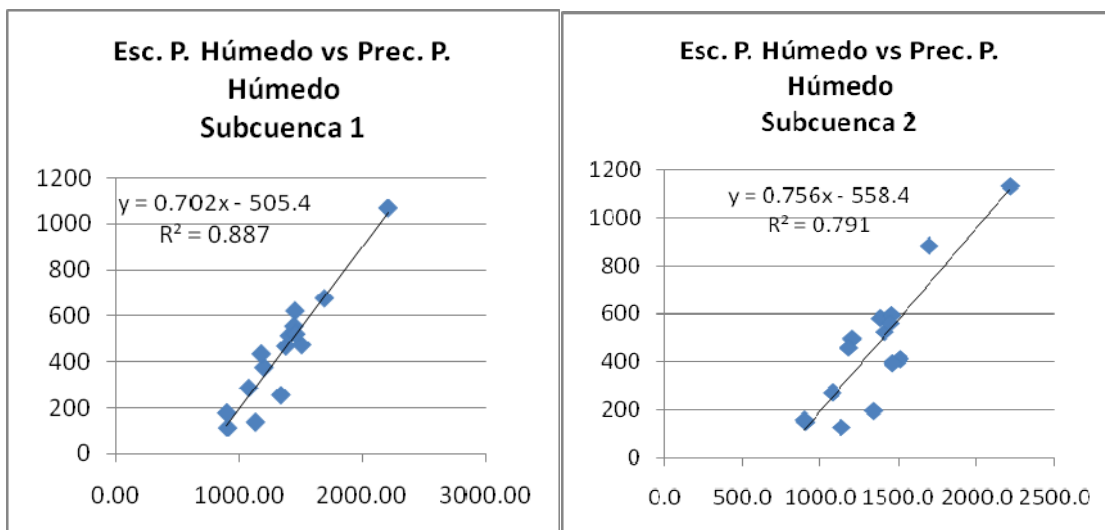
mantenimiento del bosque, pueda alterar el rendimiento del primero (escurrimiento),

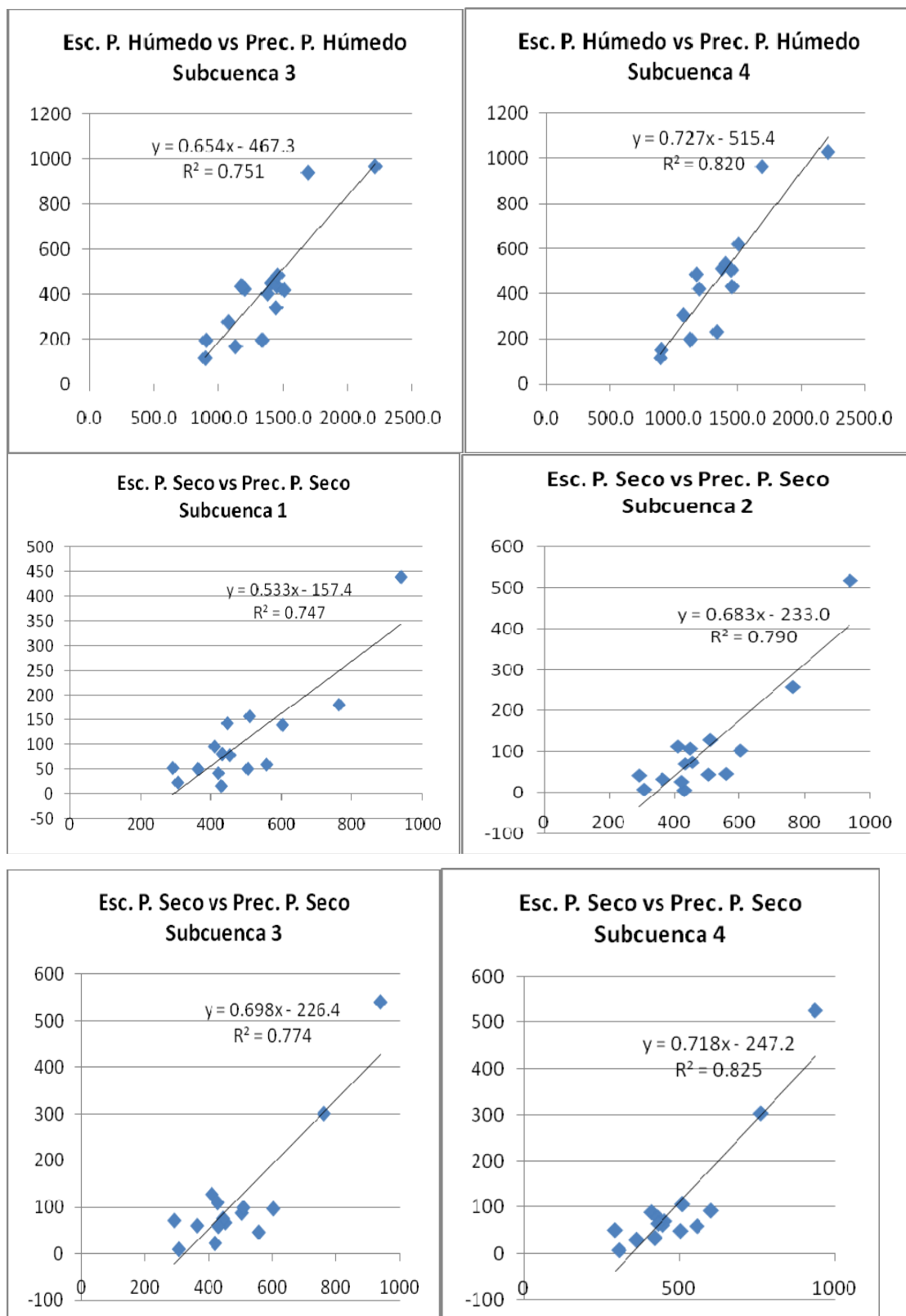
La regresión lineal con significaciones de los coeficientes de determinación $p < 0,01$ ó $p < 0,001$ es lo más habitual en la literatura existente sobre relaciones entre las P y Q anuales y así ocurre en nueve de las quince referencias recopiladas en Piñol (1999) en la que se pretendía destacar precisamente lo contrario, la falta de significación o los valores de R^2 con nivel de significación de $p < 0,05$.

Falta de significación en la regresión de datos anuales de P y Q de microcuencas han sido descritos por Prebble & Stirk (1988) en un bosque abierto de Queensland (Australia) y por Stoneman (1993) en un bosque de *Eucalyptus* del oeste del mismo país, Regresiones con valores mínimos de significación se citan en Piñol (1999) en los bosques de encinas de las sierras del Montseny y Prades y en Grecia para bosques de *Abies cephalonica* por Nakos y Vouzaras (1988) y Fischer (1996).



Figuras 6.4 y 6.5.- Relaciones entre P y Q en las cuencas 3 y 4 con datos anuales.





Figuras 6.2 a 6.13. Relaciones lineales entre P y Q en las cuatro cuencas.

6.3 Cálculo de la evapotranspiración y su relación con la precipitación y sus perspectivas ante el cambio climático.

La evapotranspiración reduce el volumen de agua de forma muy diferente en dependencia de la vegetación, suelo y el clima de cada país y para tener una idea de cómo se pudiera comportar ésta en diferentes lugares a continuación se exponen tres ejemplos de investigaciones realizadas en diferentes sitios: Características diferenciales del bosque mixto de Hubbard Brook, (EE.UU); el encinar de L' Avic, (España) y el bosque de coníferas de la Estación "Amistad", (Cuba), (Tabla 6.6)

Tabla 6.6. Relación entre precipitación (P), escurrimiento (Q) y evapotranspiración (ETR) total de cada período seleccionado, en diferentes lugares.

Lugar	P Mm	Q mm	E _A Total mm	Coeficiente Evapotranspiración	Coeficiente Esgurrimiento
Bosque Mixto	1296 (11 años)	800	496	0,38	0,62
Encinar	560 (7 años)	55	505	0,90	0,10
Bosque de coníferas	1880 (22 años)	553	1327	0,71	0,29

Como se puede observar en la tabla 6.6, en los bosques mixtos de Hubbard Brook, la lluvia osciló en esos años entre 950 y 1860 mm con una media para ese período de 1296 mm ofreciendo un escurrimiento total de una lámina de 800 mm equivalente al 62 % de la lluvia caída considerada de alta magnitud, sin embargo la evapotranspiración sólo fue de 496 mm para un coeficiente de evaporación de 0,38.

En el segundo caso en el encinar L' Avic, la precipitación de ese período osciló entre 392 y 715 mm, con una media de tan solo de 560 mm anual, con un escaso escurrimiento total de 55 mm que representa el 10 % de del total de la lluvia caída,

entre otras causas por la alta evapotranspiración de 505 mm que representa un coeficiente de evapotranspiración del 0,90 (Lledo, 1990).

En el tercer caso (Estación Amistad) donde se analiza el período de 22 años, siendo la lluvia de éste entre 1104 y 2844 mm para un promedio de 1880 mm; en esta área hubo una lámina de escurrimiento total de 553 mm, equivalente a un coeficiente de escurrimiento de 0,29 o sea el 29 % del total de la lluvia caída. Batista (1982) da para 157 km² de la cuenca del río San Diego en la estación Gavilanes (donde según los datos de la ordenación Forestal de la provincia de Pinar del Río la vegetación boscosa sólo ocupa el 37,8 %) una lámina de escurrimiento de 619 mm, que si lo relacionamos con el promedio de la lluvia en esa cuenca según el mapa Isoyético, (Caguas *et al.*, 1976), da un coeficiente de escurrimiento de 0,343, lo que sería igual al 34,3 % de la lluvia. Si se compara el escurrimiento ofrecido por Batista para esta cuenca del Río San Diego con la del Área de la Estación Amistad (control), la cual se mantuvo forestada durante estos 22 años, se nota que la diferencia es solo de 5,3 %. Al mismo tiempo se produjo en este período una evapotranspiración de 1327 mm año⁻¹ muy parecida a la citada por Bruijnzeel (2004), sobre los bosques y la producción de agua donde plantea que el bosque tropical maduro ha dado valores de 1350 mm año⁻¹. La Estación Amistad con un coeficiente de evaporación total del 0,71 está por encima en 0,33 del primer caso (EE.UU) y por debajo en 0,90 del segundo caso (España), esto da idea de la variación de este indicador en función de las características específicas de cada región.

En el caso de la evapotranspiración y la precipitación, la relación es inversa, aunque la cantidad de evaporación es menor en el período seco (390 mm) que el período húmedo (937 mm), el coeficiente de evapotranspiración en el caso del período seco fue de 0,79 estando por encima en 0,08 de la media anual, mientras que el coeficiente de evapotranspiración del período húmedo fue de 0,68 estando 0,11 por debajo del período seco y 0,03 de la media anual.

Como se puede observar en dicha tabla durante esos 22 años en el período seco ocurrió el 26 % de las precipitaciones, mientras que en el período húmedo fue del 74 % (Plasencia 2005). La partición de los años de análisis en los primeros 11 años y los

segundos 11 años permitió observar que en el primer período precipitaron 1811 mm y el segundo 1948 mm para una tendencia del aumento en 137 mm (Tabla 6.7).

En el caso del período seco en los últimos 11 años la tendencia fue de disminuir la precipitación, el escurrimiento y la evapotranspiración respecto a este mismo período seco de los primeros 11 años (79 - 91); sin embargo la tendencia del coeficiente de evaporación total fue de aumentar (0,82) y por consiguiente disminuyó el coeficiente de escurrimiento (0,18).

Tabla 6.7 Relación entre precipitación, escurrimiento y evapotranspiración por período (22 años 1979 - 2002), los primeros 11 años (1979 –1991) y los segundos 11 años (1992 – 2002) en los respectivos período Seco y Húmedo, excluyendo los años 1985 y 1986.

Período	P	Q	E_A	Coeficiente Evapotranspiración	Coeficiente Eskurrimiento
Total 22 años	1880	553	1327	0,71	0,29
Seco 22 años	495	105	390	0,79	0,21
Húmedo 22 años	1385	448	937	0,68	0,32
11 años (1979 – 1991) Seco	546	130	416	0,76	0,24
11 años (1979 – 1991) Húmedo	1265	370	895	0,71	0,29
11 años (1992 – 2002) Seco	444	81	363	0,82	0,18
11 años (1992 – 2002) Húmedo	1504	526	978	0,65	0,35

En el caso del período húmedo la tendencia se muestra de signo contrario o sea, en los segundos 11 años la precipitación, el escurrimiento y la evapotranspiración aumentaron, no así la relación del coeficiente de evapotranspiración total (0,65) que disminuyó respecto a los primeros 11 años que fue de (0,71) y por ende el coeficiente de escurrimiento aumentó de 0,29 a 0,35.

Desde el punto de vista de la perspectiva del cambio climático, en los últimos 11 años se observa un aumento en las precipitaciones (137 mm) respecto a los primeros 11 años; no sucediendo así en el período seco, donde la tendencia es a la disminución (102 mm), de la misma manera la lámina disminuyó en 49 mm. El análisis estadístico indica que para el caudal total no hay tendencia alguna ($r = -0,070$ con 14 grados de libertad). También este análisis indicó que para el caudal de los meses de lluvias tampoco hubo tendencia ($r = -0,128$, con 14 grados de libertad) y que para los meses secos casi hay una tendencia significativa al descenso del escurrimiento ($r = -0,459$ y 14 grados de libertad es significativo a $P < 0,05$ y el valor de r igual a 0,497).

A continuación se efectuarán algunas estimas de evapotranspiración y las relaciones con la precipitación en las cuatro microcuenca objeto de estudio de la Estación Amistad (1, 2, 3 y 4).

Como ya se ha indicado en el análisis de la hidrología de las cuencas de Hubbard Brook (Likens, 1977) el valor de la evapotranspiración real (ETR) calculada por el método del balance hídrico se mantiene prácticamente constante a lo largo del período analizado, pese a que comprende valores de lluvia anual entre 800 y 1800 mm. Este es, sin duda, el resultado esperable en un bosque de una zona templada y húmeda, cuyo proceso transpiratorio no resulta casi nunca afectado por la falta de disponibilidad de agua (Roberts, 1999) y donde los valores de evapotranspiración potencial (ETP) estén bastante por debajo de los de precipitación (P). Según Roberts (1983) la retroalimentación negativa entre la conductancia estomática y la humedad del aire jugaría un papel importante en limitar la transpiración y mantener constantes los valores diarios.

Para el caso de los bosques tropicales húmedos, más de 2000 mm de lluvia anual ofrece una estima del parámetro de la regresión lineal (1263,3 mm) que representa el volumen de agua, en este caso ETR, que hay que añadir a Q para obtener P, que resulta bastante coherente con los datos de balances existentes y la hipótesis de que en los bosques más frondosos de los trópicos los valores de las ETR y ETP tienden a ser coincidentes (Vörösmarty 1989; Richards 1996).

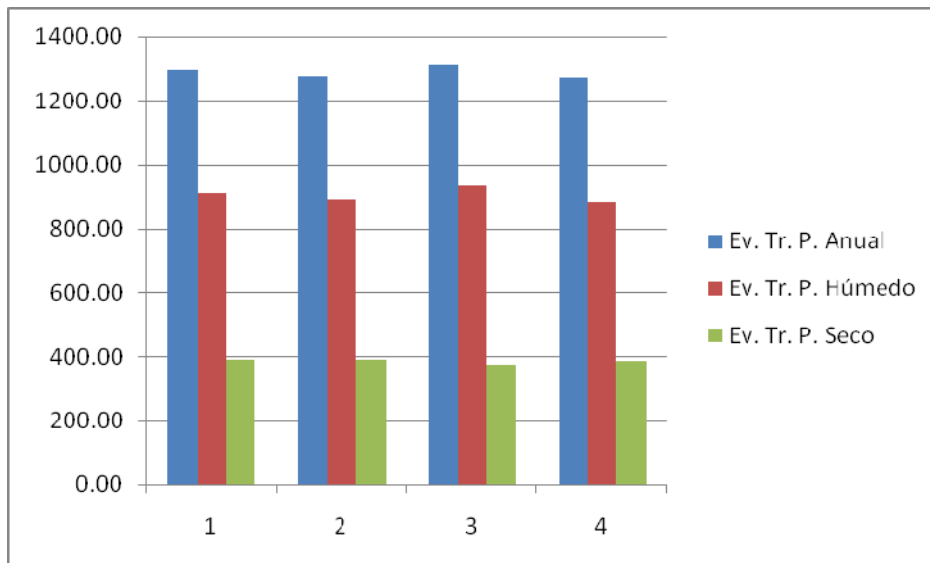


Figura 6.14 Valores de evapotranspiración (mm) totales, por épocas y subcuencas del área de estudio para el período hidrológico 1979 al 2001.

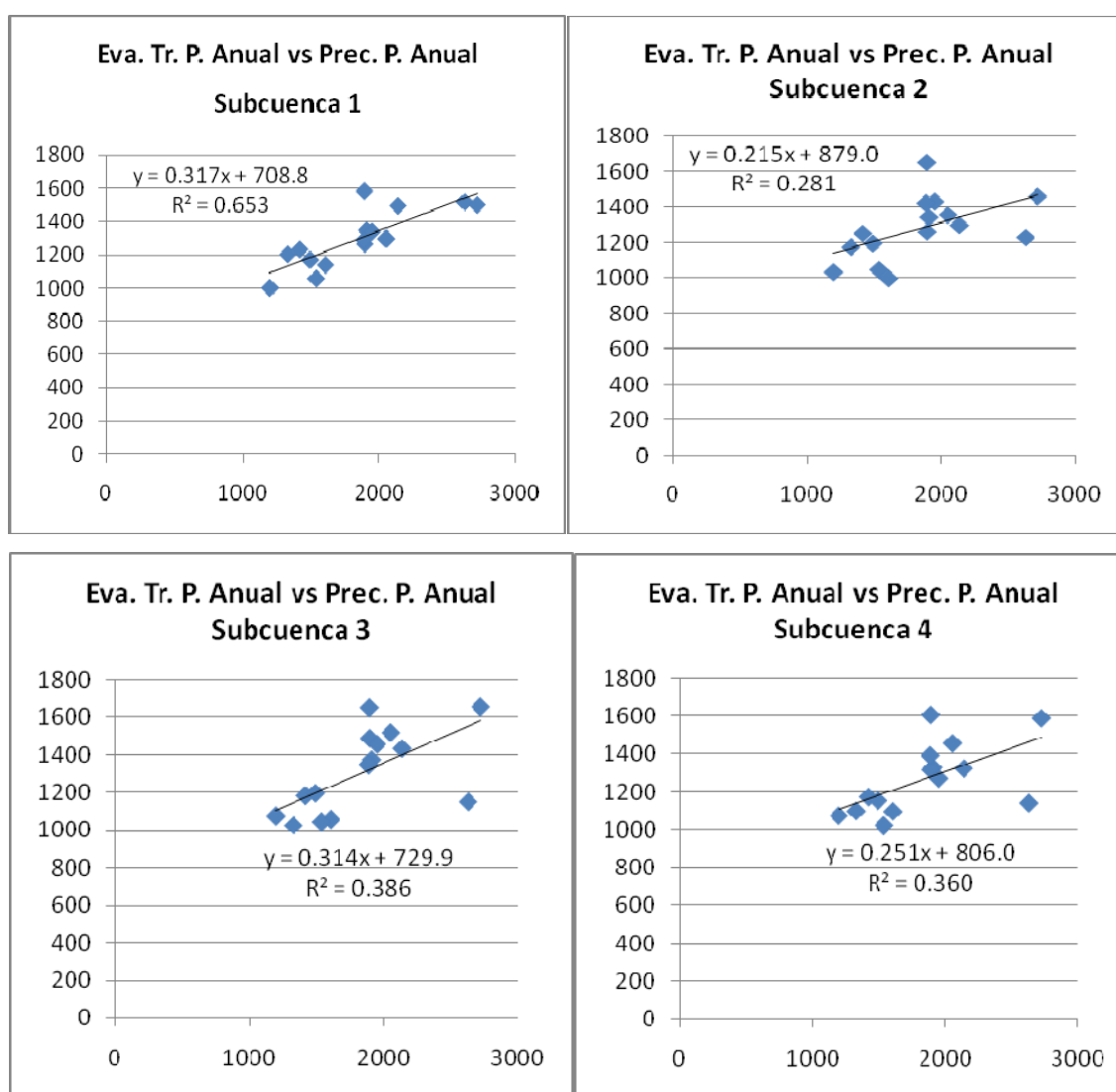
En la figura 6.14 vienen representados los valores de ETR anuales y correspondientes a las épocas seca y lluviosa de las cuatro cuencas en estudio. Se aprecia menos desequilibrio en la distribución del flujo de ETR entre las épocas seca y lluviosa, en relación con la correspondiente al escurrimiento ya que en este caso los por cientos para los seis meses de sequía oscilan entre el 25 y el 29 %. Respecto a la precipitación recibida en cada una de las épocas, las cuencas pierden por ETR entre el 68 y el 79 % en la época seca y entre el 53 y el 68 % en la lluviosa..

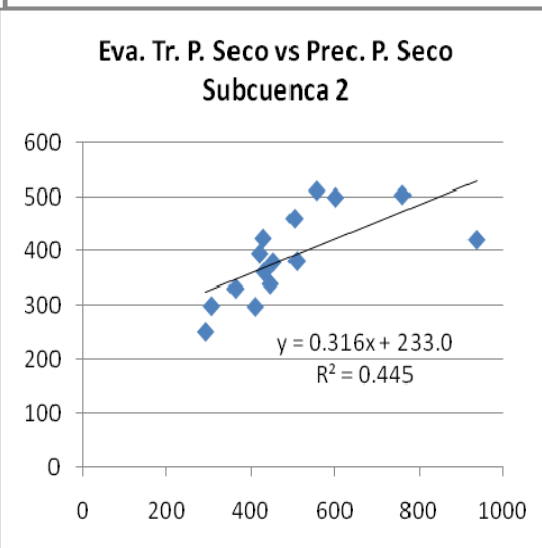
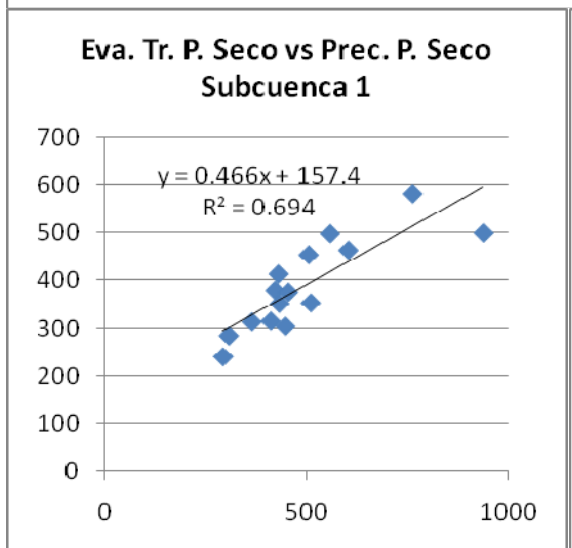
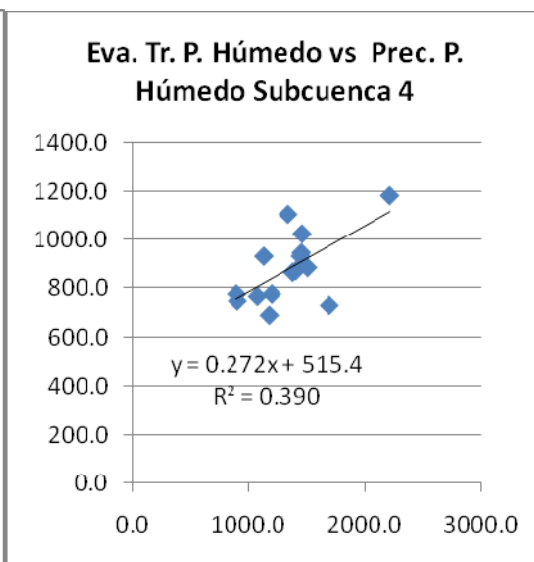
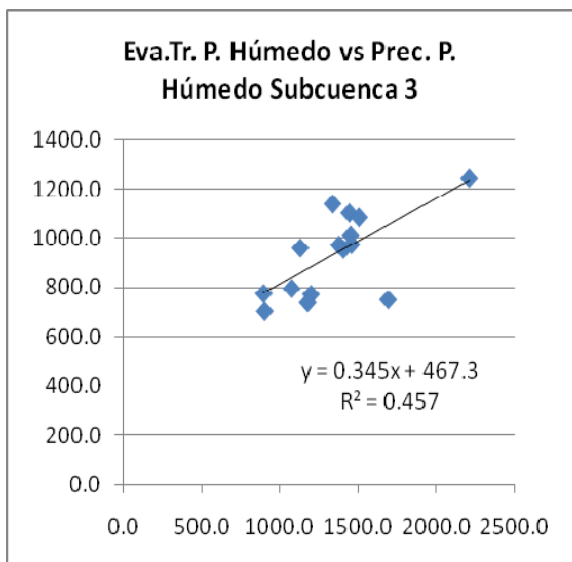
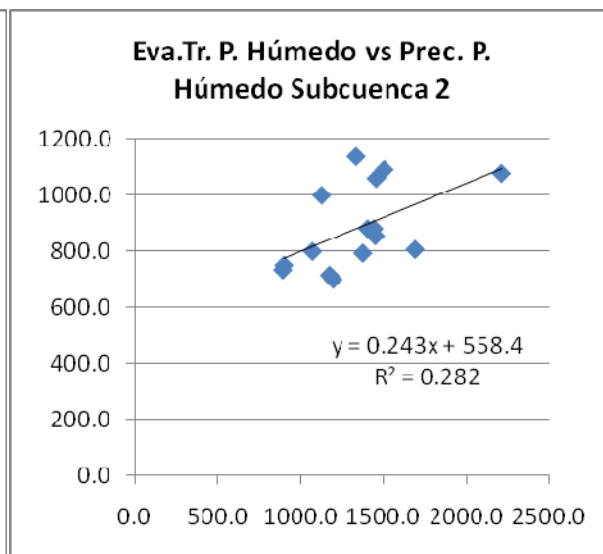
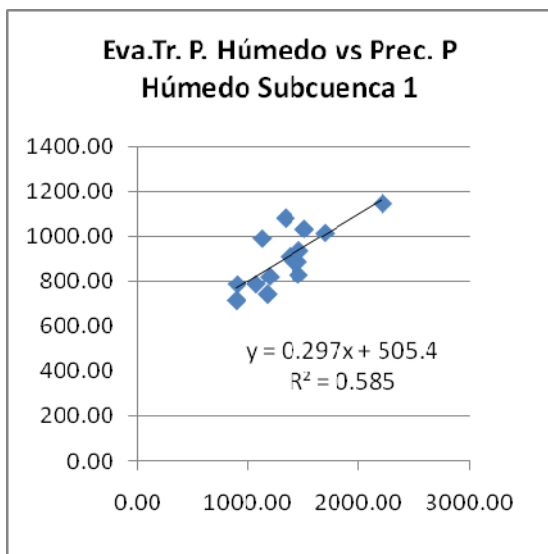
Respecto a bosques de pinos, los ejemplos de *Pinus ponderosa* de Arizona recopilados en Bosch y Hewlett, y que corresponden a un gradiente de P entre 600 y poco más de 800 mm presentan valores de ETR anual que oscilan entre 425 y 727 mm (coeficientes entre 0,75 y 0,89), En el caso de *Pinus armandii* en China, con una P ligeramente superior a 1000 mm/año el valor anual de ETR es de 822 mm (coeficiente de ETR 0,82) (Meng Guang, 2001), En un tabla recopilatoria de Bruijnzeel (1997) se muestran los resultados obtenidos en dos plantaciones de *Pinus caribaea* de 6 y 15 años en Fiji en un área con 1800 mm de lluvia anual: en la primera de ellas se estima una altísima ETR de 1770 mm y en la segunda de 1510 mm lo que representan valores del coeficiente de

evapotranspiración de 0,98 y 0,83 respectivamente, El pinar de la cuenca control de la Estación Amistad tiene un coeficiente de ETR de 0,71, que es acorde con los valores mencionados de otros pinares.

6.4, Relaciones entre precipitación y evapotranspiración (subcuencas Estación Amistad).

En las figuras 6.15 a 6.26 aparecen las regresiones lineales entre P y ETR, para todos los datos del año o los correspondientes a las épocas húmeda y seca.





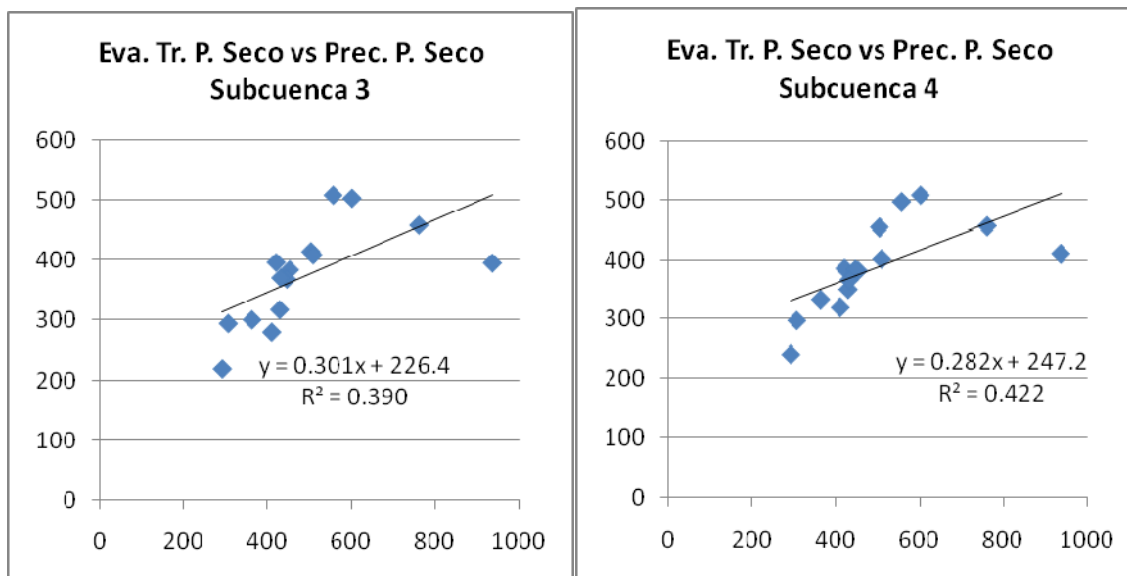


Figura 6.15 a la 6.26. Regresiones lineales entre P y ETR para los años hidrológicos completos y para las épocas seca y lluviosa de las 4 subcuencas de la Estación Amistad.

En estas figuras se pone de manifiesto, en primer lugar, que los valores del coeficiente de determinación son inferiores a los encontrados en la relación entre P y Q. Tiene especial interés el hecho de que en tres de las subcuencas (1, 2 y 4) los mayores valores de R^2 se den precisamente en las relaciones que corresponden a los valores de la época seca, lo que indica que en ese período los procesos hidrológicos se asemejan a los que se dan en cuencas mediterráneas, en las que, en las épocas de sequía P es una variable que predice mejor ETR que Q.

6.5. Modelo general de la partición de la lluvia entre escurrimiento y evapotranspiración con las tendencias en los escenarios previstos de cambio climático.

Piñol (1990) y Piñol (1991, 1999) proponen un sencillo modelo general para explicar la partición de la precipitación (P) entre el escurrimiento (Q) y evapotranspiración real (E_A) en el que la variable clave es la relación P / E_T (E_T = evaporación potencial). En las gráficas 50 y 51, se representan algunos de los valores de Hubbard Brook y los encinares españoles que aparecen en los trabajos mencionados, pero con el añadido, en cada par de curvas, de los correspondientes a áreas del presente estudio para las

que resulta posible contar con medidas del evaporímetro, como es el caso de la Estación Amistad, Los datos se ajustan de forma aceptable a las siguientes funciones teóricas:

$$e_A = [p^k / (1 + p^k)]^{(1/k)} \quad y \quad q = p - [p^k / (1 + p^k)]^{(1/k)}$$

$$\text{con } p = P / E_T, \quad e_A = E_A / E_T \quad y \quad q = Q / E_T$$

ecuación (1), en las que resulta fácil entender por qué la relación de E_A y P fue significativa para valores bajos de P , como ocurre en época seca con las tres cuencas investigadas; y también por qué al contrario, la relación de Q con P es significativa con valores elevados de P .

Tabla 6.9. Valores de P , E_A , E_T y escurrimiento promedios para el período 1961 – 1990 y previsiones para los años 2010, 2030, 2050 y 2100, en Cuba.

Período CUBA	P (mm)	E_A (mm)	E_T (mm)	Q (mm)	E_A/E_T y	P/E_T x	Q/E_T y
1961 - 90	1329	1049	1706	281	0,61	0,78	0,16
2010	1309	1051	1762	258	0,60	0,74	0,15
2030	1290	1051	1811	239	0,58	0,71	0,13
2050	1269	1050	1875	218	0,56	0,68	0,12
2100	1219	1043	2016	176	0,52	0,60	0,09

Fuente: Centella (2001).

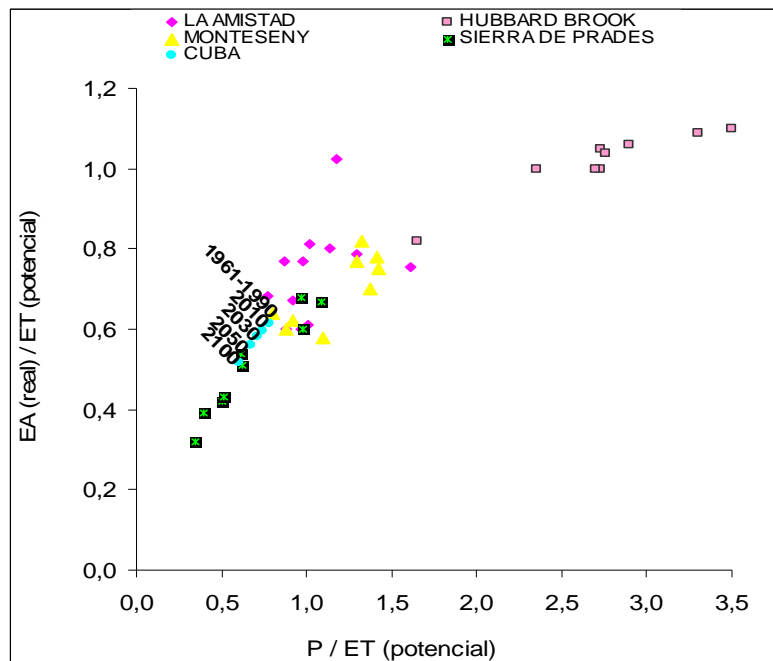


Figura 6.17. Modelo general de la partición de P entre Q y E_A

También se han representado en todas estas gráficas los datos que aparecen en la tabla 6.9, tomados de Centella *et al.* (2001) y que son los valores de P, E_A , E_T y escurrimiento promedio para el período 1961 -1990, para el conjunto de Cuba, así como las previsiones para 2010, 2030, 2050 y 2100 según el modelo HADCM2. Es interesante observar como en las gráficas de E_A los puntos se ordenan de menor a mayor valor del cociente E_A / E_T con un aumento del mismo para épocas futuras, mientras que al contrario los valores de Q respecto a E_T se harían más pequeños a medida que se avanza en el siglo XXI.

En las gráficas se puede apreciar Figura 6.17 y 6.18 que los datos de la estación Amistad están por encima de la curva teórica. Estas diferencias podrían explicarse por el parámetro k, que como indica Piñol (1991) es único para cada microcuenca y tiene que ver con los factores que determinan la partición de P en Q y E_A , como pueden ser la capacidad de almacenamiento de

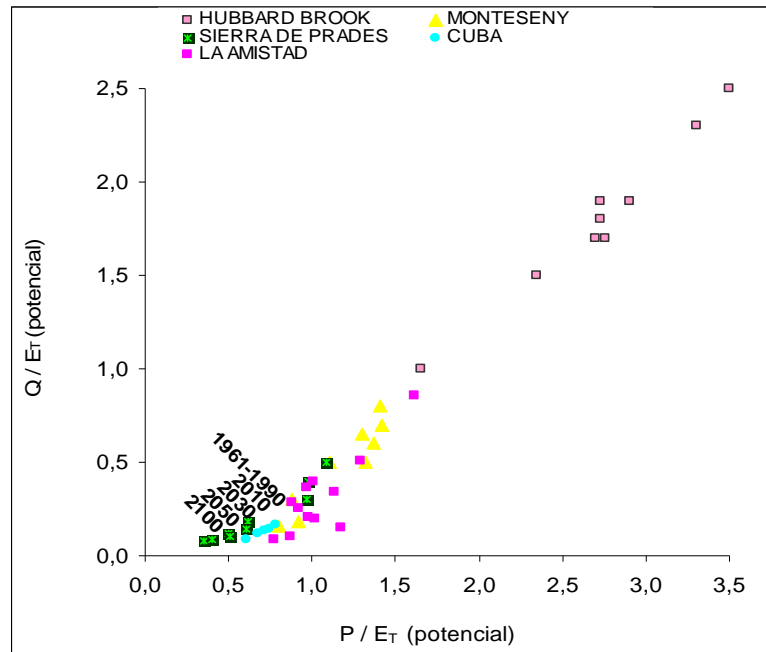


Figura 6.17. Modelo general de la partición de P entre Q y E_A

agua en el suelo y la estructura de la vegetación, entre otros. El valor de k utilizado en estas curvas es de 2 y es de suponer que valores algo mayores para un pinar denso como el de Amistad.

Muchas de las mejores previsiones de cambio climático se han hecho sobre áreas muy extensas como es la Amazonía, donde se ha observado que la deforestación tiene como efecto la disminución de E_A como consecuencia del incremento de albedo que representa cambiar bosque por pasto y también por la menor profundidad de exploración del perfil del suelo de las gramíneas respecto a los árboles (Salati y Nobre, 1991). Las predicciones para áreas menores son mucho más complejas. Piñol *et al*, (1995) tiene el interés de comparar la hidrología de dos cuencas situadas en un gradiente de precipitación anual en las que, utilizando las previsiones de P y de E_A de los escenarios de incremento de la concentración de dióxido de carbono, pueden concluir una evolución de la situada en el área más húmeda hacia un comportamiento similar al que presenta ahora la de la zona de mayor sequía.

La proyecciones climáticas muestran, además, la posible intensificación y extensión espacial de la aridez, así como una mayor frecuencia de los procesos de sequía, en tal circunstancia, la disminución de los recursos hídricos potenciales será notable, Adicionalmente, la frecuencia de sequía se ha incrementado significativamente desde 1960, todo estas variaciones parecen estar relacionadas con la posible reintensificación del ciclo Hidrológico causado por los procesos de calentamiento, (Trenberth y Shea, 1997).

6.6. Conclusiones:

- 1.- En los bosques de coníferas el coeficiente de evaporación total tiende a disminuir cuando las precipitaciones tienden a aumentar en su total anual y su distribución en el año es más uniforme.
- 2.- En el período 1979 – 2003 los indicadores principales de escurrimiento en el pinar natural (lámina, módulo y coeficiente de escurrimiento) alcanzaron los siguientes valores: 538 mm, 0,17 l seg⁻¹ha y 0,28 respectivamente.
- 3.- Al analizar la relación entre precipitación, escurrimiento y evapotranspiración en la Estación Amistad en comparación con estaciones de otros países EE, UU (bosque mixto) y España (encinar)], se comprobó que el coeficiente de evapotranspiración es menor al caso de España, pero casi el doble con respecto a EE. UU, ocurriendo lo contrario con el coeficiente de escurrimiento, lo cual es congruente con las condiciones climáticas de cada territorio.
- 4.- Según los analisis estadísticos, en las subcuencas de la Estación Amistad hay una alta significación entre la precipitación y el escurrimiento anual y en el período húmedo (significativos $p < 0,000$ y a $p < 0,001$), pero en el período seco los cuales son menos significativos.
- 5.- Según análisis estadístico en la subcuencas de la Estación Amistad las relaciones entre precipitación y la evapotranspiracion anual y el período húmedo hay significación menor que con el escurrimiento pero los mayores valores del coeficiente de determinación se encuentran, en tres de las cuencas en el período seco.

6.- Teniendo en cuenta el modelo general de la partición de la lluvia entre escurrimiento y evapotranspiración de Piñol en el caso de la Estación Amistad tiene una tendencia en los escenarios previsto de cambio climático, hacia un clima más árido aumentando la evapotranspiración y disminuyendo el escurrimiento, con énfasis en el período seco.

CAPÍTULO 7.- CARACTERIZACIÓN DEL pH DE LA DEPOSICION TOTAL

7.1. Introducción

En una gran mayoría de las experiencias de gestión en microcuencas, como las que aparecen en la recopilación de Bosch y Hewlett (1982) se hace un seguimiento únicamente de los volúmenes de precipitación y escurrimiento y solo en algunos casos se valora la producción de sedimentos (Ingebo y Hibbert 1974, Helvey 1980) pero no se atiende a los cambios en las características químicas del agua de los arroyos, y mucho menos al análisis de la composición del agua de lluvia.

En el diseño y en la fijación de objetivos de la estación Amistad, si se consideró desde el principio el gran interés que tendría poder estimar el escurrimiento sólido y también poder valorar la influencia que las experiencias de gestión pudieran tener en la calidad del agua. Sin embargo no se incluyó el seguimiento de los aportes químicos de la precipitación que sin embargo son muy relevantes en la concepción teórica del “ecosistema cuenca” que se inicia en la estación experimental de Hubbard Brook (Likens *et al.* 1977).

El panorama sobre las características de la deposición atmosférica que se resume en López (2006) y la misma constatación de la evolución del pH de los arroyos durante el periodo de estudio aconsejó la instalación de un colector de deposición total, durante unos meses, para poder realizar, conjuntamente con otras dos estaciones en la provincia de Pinar del Río (Morejón 2009) un seguimiento de los valores de pH de la lluvia, analizados en cada evento lluvioso. Así pues, los objetivos del presente capítulo son:

- Caracterizar las condiciones de acidez de la precipitación, en concreto de la deposición total, en la estación Amistad.
- Analizar la relación existente entre el pH de la lluvia (o la concentración de hidrogeniones) y el volumen de precipitación.

Las hipótesis relacionadas con dichos objetivos son:

- La deposición global en la estación Amistad tiene un carácter predominantemente ácido.
- La capa atmosférica que contacta con el suelo tiene una cierta capacidad de neutralización que se pone de manifiesto en que las precipitaciones de mayor volumen tienen carácter más ácido.

7.2. El problema de la acidificación de la lluvia.

Robert Smith, el primer inspector británico de calidad del aire, describió en 1852 los primeros efectos de la deposición ácida en el entorno industrial de la ciudad de Manchester (Park, 1997). Desde entonces, y a lo largo de un siglo, las emisiones de SO₂ y NO_x, los principales gases responsables de la acidez de la lluvia, no hicieron sino incrementarse de forma continuada (Dignon y Hameed, 1989). A pesar de que desde los años veinte del siglo pasado se hicieron patentes varios síntomas de acidificación en las aguas continentales del sur de la península escandinava, hasta la década de los sesenta no se tuvo conciencia de la importancia del problema de la presencia generalizada de compuestos ácidos en la atmósfera, que podían ser transportados a grandes distancias (Park, 1997).

Los mapas de áreas afectadas por las lluvias ácidas muestran dos zonas especialmente críticas, NE de Estados Unidos y E de Canadá, y W de Europa, pero también otras emergentes localizadas en Corea - Japón, S de Australia, N y E de América del Sur y W y S de África (Jones, 1997, Seager. 2000). El transporte transfronterizo de contaminantes capaces de producir acidificación es todavía un problema grave y complejo. Así, en Noruega, se calcula que el 80 % de la deposición ácida que recibe corresponde a emisiones que se han generado fuera del país. Los esfuerzos en conseguir acuerdos de limitación de emisiones de óxidos de azufre y nitrógeno, las mejoras tecnológicas y legislativas, han conseguido resultados en la disminución de la concentración de sulfato no marino y el consiguiente incremento del pH de la lluvia, en diversos países como Estados Unidos (Hedin *et al.*, 1987, Shannon, 1999, Lynch *et al.*, 2000), Noruega (Berge, 1988), Dinamarca (Houmand y Andersen,

1995) Croacia (Alebic, 1995), España (Ávila, 1996) o parte de Asia (Foell *et al.*, 1995) pero en otros casos como en Suecia, en el período comprendido entre 1980 y 1987, la disminución del 50 % de las emisiones de azufre solo consiguió una reducción del 8 % de la deposición ácida (Jones, 1997).

En América tropical es escasa la información existente sobre las características químicas de la precipitación. Vallory (1999) en Belo Horizonte (Brasil) encuentra valores de pH ponderados por volumen de lluvia que varían entre 4,98 y 5,27, pese a que en los puntos de recolección de las muestras se constató la existencia de procesos de neutralización por partículas calcáreas. Lewis y Weibezhan (1981), en una cuenca venezolana, miden valores de pH de 3.4 que atribuyen al efecto de acidificación de los óxidos de nitrógeno que provienen de incendios, que se dan mayoritariamente en época de seca con lo que se genera un patrón estacional bastante regular de este parámetro. En estas zonas conviene tener en cuenta el posible efecto de ácidos orgánicos volátiles emitidos por la vegetación (Bridgman, 1989) y así, dos Santos *et al.* miden cantidades apreciables de ácidos acético, fórmico y oxálico, en muestras de aguas de lluvia en la ciudad de Sao Paulo (Brasil), parte de las cuales las atribuyen a emisiones biogénicas.

En el período comprendido entre 1981 y 1994 funcionó en Cuba una red de diecinueve estaciones, dependientes del Instituto de Meteorología del CITMA, para la observación de las características químicas del agua de lluvia, pero solo algunas de ellas se mantuvieron activas en una segunda etapa que va desde 1995 al 2004 (López, 2006).

La metodología de muestreo de la precipitación que se utilizó es la recomendada por el sistema VAG (Sistema de Vigilancia de la Atmósfera Global), de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 1988) que consiste en tomar colectores manuales de polietileno que se disponen sobre una base estable a 1,5 m sobre la superficie del suelo. La exposición se hace solamente durante la lluvia y se retiran al finalizar ésta, por lo que se consideran colectores de deposición húmeda. Las técnicas analíticas son las estándar Absorción Atómica, Fotometría de Llama, Espectrofotometría y Volumetría en función del ión que se analiza. Los valores anuales de pH son medias

ponderadas por volumen de lluvia mensual, pero calculadas no directamente del pH, sino a partir de la concentración de hidrogeniones (López, 2006).

Como resultado más destacado de esta investigación mantenida durante trece años hay que resaltar el que, durante el período, se produce un claro aumento de precipitaciones con valores de pH menores de 5,6. Cuando se comparan los histogramas de las frecuencias de lluvias con distintos valores de pH, en los períodos 1981 - 1987 y 1988 - 1994, es posible observar que en bastantes de las estaciones de la red se incrementa la frecuencia de los valores de pH más ácidos, tal es el caso de La Palma (Pinar del Río), Colón (Matanzas) y Palo Seco (Camagüey), entre otras (López, 2006).

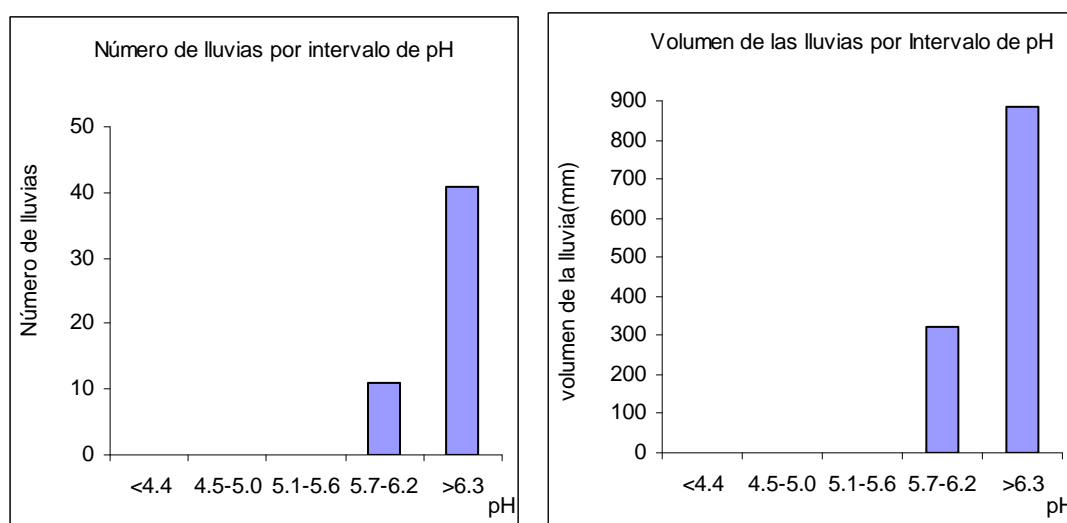
Con posterioridad, López (2008), constata que en los primeros años de este siglo disminuyó algo la frecuencia de las lluvias ácidas, en las estaciones que mantienen la rutina de su seguimiento, y atribuyó los picos reportados en el período de 1990 a 1995, a un significativo incremento asociado a la quema de mayores volúmenes de biomasa. Sin embargo, en investigaciones realizadas en cuatro de las estaciones de monitoreo de la contaminación atmosférica que se mantienen en la actualidad (La Palma, Colón, Falla y Palo Seco), que entre el período comprendido entre los años 2006 y el 2007 se observó una ligera tendencia al aumento de las emisiones de algunos de los compuestos causantes de la lluvia ácida, lo que se podría relacionar con el creciente empleo del crudo nacional que presenta una mayor concentración de azufre.

7.3. Caracterización de la deposición total en tres estaciones de la provincia de Pinar del Río.

Con el fin de complementar la información ya existente sobre la lluvia ácida en Cuba, se decidió realizar muestreos puntuales de deposición global, en los que se analizase el pH de la precipitación justo después de cada evento. Se pudo obtener la información de la Estación Hidrológica Forestal Amistad y también se realizó el seguimiento de algunas precipitaciones en la misma ciudad de Pinar del Río, y en la Estación Meteorológica de La Palma (Morejón 2009).

Para el caso de la Estación Hidrológica Forestal Amistad, el número total de muestras de deposición global recolectadas es de 87, y en el intervalo de tiempo que va desde el 17 de septiembre del 2003 hasta el 12 de febrero del 2006. El punto exacto de muestreo en la ciudad de Pinar del Río, se ubica al este, en el reparto 10 de Octubre. El número de eventos lluviosos muestreados es de 53, durante el período comprendido entre enero y octubre del 2006. La Estación Meteorológica de La Palma se ubica en el municipio del mismo nombre, al norte de la provincia de Pinar del Río y llevo a cabo el muestreo de 35 lluvias, durante la época comprendida entre mediados de marzo y octubre del año 2006 (Morejón 2009).

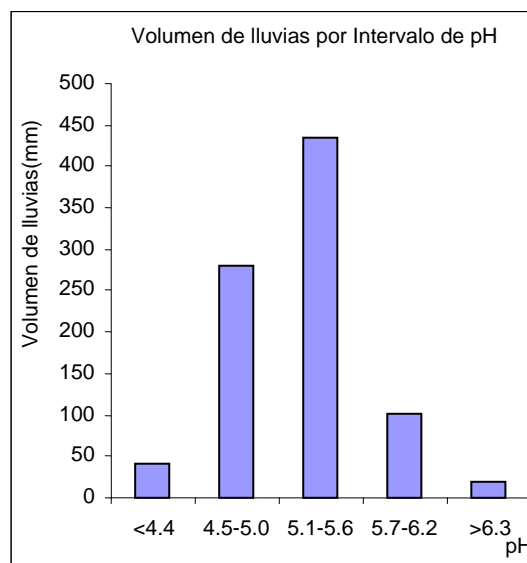
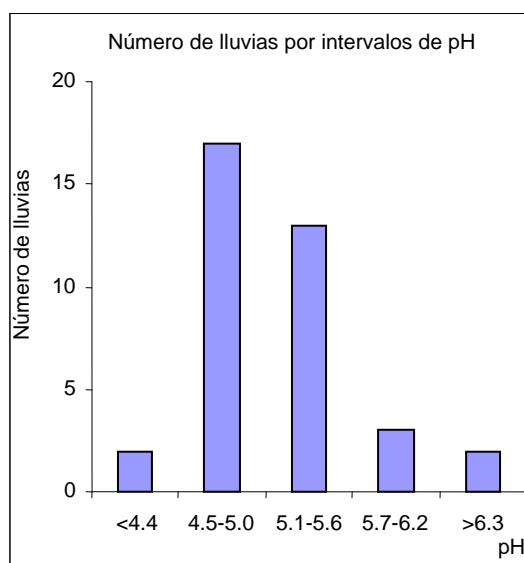
En las figuras 7-1 a 7-6 aparecen representados los histogramas de número de lluvias y volúmenes de precipitación, por intervalos de pH, con el valor de 5,6 elegido como límite, para poder separar las lluvias que se consideran ácidas de las que no.



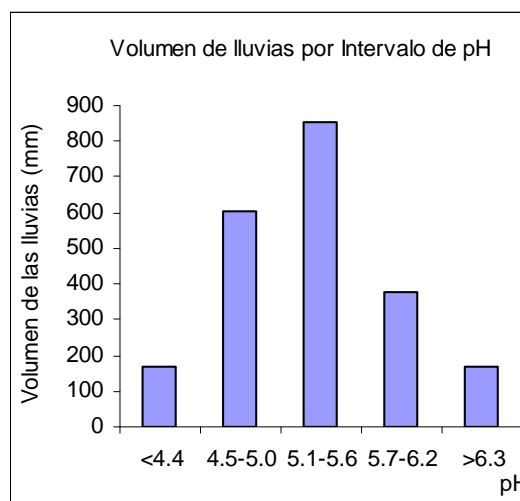
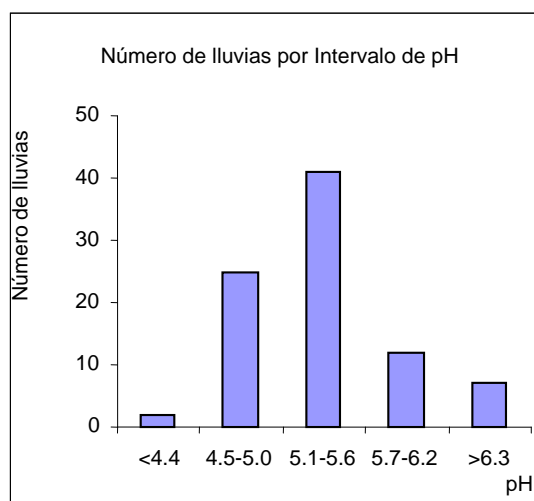
Figuras 7-1 y 7-2. Representación gráfica de los números de lluvias y volúmenes de precipitación que corresponden a los diversos intervalos de pH, en la ciudad de Pinar del Río (Morejón 2009)

La comparación de las figuras permite destacar que mientras que en la ciudad de Pinar del Río no se registran lluvias que se puedan considerar ácidas, en las otras dos estaciones el número de lluvias por debajo de 5,6 es del 86,4 % para La Palma y el 78,2 % en Amistad. Respecto a los volúmenes el 86,3 % del

agua de lluvia recolectada en La Palma se puede considerar ácida, mientras que en La Amistad este mismo porcentaje solo alcanza el 74,8 %.



Figuras 7-3 y 7-4. Representación gráfica de los números de llluvias y volúmenes de precipitación que corresponden a los diversos intervalos de pH, en la Estación de la Palma (Morejón 2009).



Figuras 7-5 y 7-6. Representación gráfica de los números de llluvias y volúmenes de precipitación que corresponden a los diversos intervalos de pH, en La Estación Hidrológica Amistad.

En las estaciones donde el “rainout” de la lluvia es ácido, pero el “washout” tiene capacidad de neutralización, como consecuencia de su basicidad, es muy

frecuente que las lluvias más copiosas sean más ácidas, y cuando se realiza un análisis detallado de los valores de pH del agua de lluvia recolectada en días sucesivos, se suele observar, que los valores de pH disminuyen. En ambos casos, el agotamiento de la capacidad de neutralización del “washout” es la que pone de manifiesto el hipotético carácter más ácido del “rainout”.

Al llevar a cabo un análisis detallado de la evolución del pH en lluvias de días sucesivos, que también es un método que permite apreciar la existencia de capacidad de neutralización en la baja atmósfera (Bellot, 1989, Carratalá, 1993 y Carratalá *et al.* 1996) se ha observado que en las estaciones de Pinar del Río y Amistad, el porcentaje de días consecutivos en que disminuye o aumenta el pH se aproxima al 50 %, es decir parece aleatorio. Por el contrario, en la Estación de La Palma, el pH aumenta en cuatro ocasiones y disminuye en nueve, de las trece analizadas.

Con estos datos de pH de la precipitación, si se extrapolan los períodos de muestreos al año completo se observa que el punto situado en la ciudad de Pinar del Río tiene un valor de deposición ácida de $0.006 \text{ keq ha}^{-1}\text{año}^{-1}$, y en la Estación Meteorológica La Palma, $0,168 \text{ keq ha}^{-1}\text{año}^{-1}$. Estos resultados coinciden bastante con el mapa de deposición de H^+ que aparece en el estudio de López *et al.* (2006).

Al analizar la posible relación entre el volumen de precipitación y la acidez de la lluvia, que como ya se ha indicado es una forma de valorar la capacidad de neutralización de las capas de la atmósfera en contacto con la litosfera, se observa (Figura 7-7) que para la concentración de hidrogeniones y el volumen de precipitación se puede aceptar un ajuste lineal con un coeficiente de correlación $r = 0.217$ y una significación estadística de $p < 0.05$. Con esto, y siempre que se acepte, como suele ocurrir por efecto de la contaminación que los valores de “rainout” son siempre más ácidos, se pondría de manifiesto la existencia de una cierta capacidad de neutralización de la capas más bajas de la atmósfera, en el área de estudio.

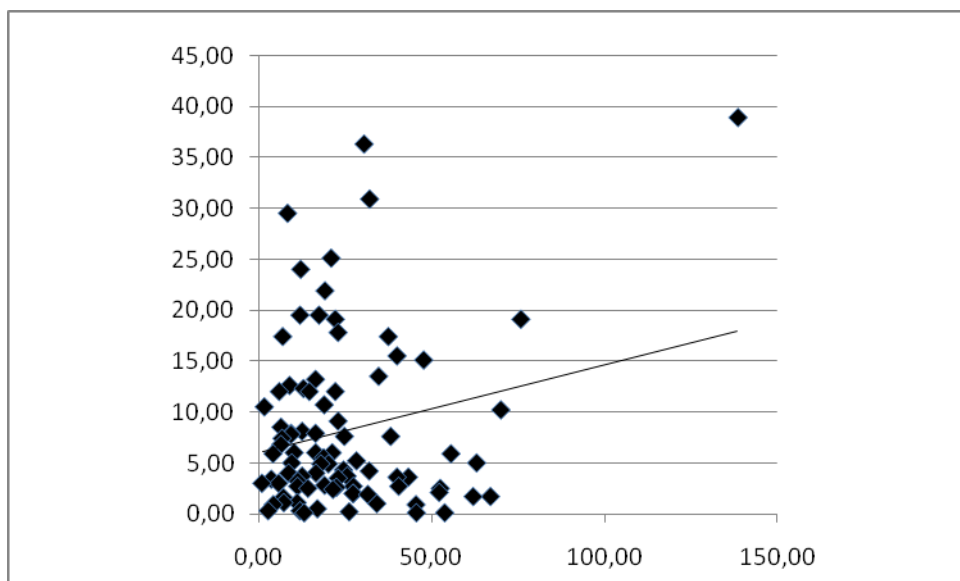


Figura 7.7.- Valores de la concentración de hidrogeniones ($\text{meq} \times 10^4$) en ordenadas, frente a volúmenes de los eventos de precipitación (mm) en abscisas.

Para el período de observación de la acidez de la lluvia, en la Estación La Amistad se han calculado unos aportes de acidez de $0,185 \text{ keq ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ que se consideran muy bajos (López *et al.* 1998). Con los datos de hidroquímica de la misma estación y que corresponden al mismo período de observación, se ha estimado una exportación de $0,083 \text{ keq ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ en la cuenca testigo por lo que se puede calcular una tasa de acumulación de hidrogeniones de $0,102 \text{ keq ha}^{-1}\text{año}^{-1}$, valor que representa, por ejemplo, la cuarta parte del observado por Nakagawa *et al.* (2001), en China.

De igual forma se ha hecho una estima aproximada de la deposición de sulfato total con la lluvia en las tres cuencas estudiadas y los valores están en el orden del medio calculado para Cuba correspondiente a una precipitación de 1800 mm y una concentración de sulfato total de aproximadamente $3,2 \text{ mg L}^{-1}$, que es de $57,6 \text{ keq ha}^{-1}\text{año}^{-1}$. Los balances calculados de este ión, en las cuencas del occidente cubano registran valores de entre $11,6 \text{ keq ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ en la cuenca del río Cuyaguatzeje y de $23,2$ y $24,2 \text{ keq ha}^{-1}\text{año}^{-1}$, en los ríos Mantua y San Juan respectivamente (Morejón 2009). Cabe sin embargo resaltar que menos de la mitad de esos aportes de sulfato se consideran de origen antrópico ya que en todas las estaciones de medida en Cuba domina el anión de origen marino (López, 2006).

Los resultados obtenidos por López *et al.* (2006), manifiestan la existencia de un claro incremento de la frecuencia de lluvias ácidas, a nivel regional en Cuba, para el período 1981 - 1994, incluso también en el punto concreto de muestreo de La Palma, provincia de Pinar del Río. Para igual período, en un análisis de los histogramas de los valores de pH de la lluvia en esta misma estación, puede apreciarse el incremento del número de casos de $\text{pH} < 4.7$ donde incluso aparecen casos de notable acidez que no se observaban en el período 1981-1987 (López, 2006).

Los aerosoles ácidos de sulfato, nitrato y amonio, al interactuar junto al polvo alcalino controlan las concentraciones de iones libres H^+ . Así en las zonas que reciben un nivel normal de emisiones antropogénicas de aniones ácidos pero con un alto aporte de componente neutralizantes se producen las precipitaciones con mayor valor de pH, tal es el caso de los resultados obtenidos para el muestreo de deposición global realizado en la ciudad de Pinar del Río. También en la Ciudad de La Habana, en la estación Santiago de las Vegas, López (2006), a pesar de que se encuentran algunos valores de acidez, aparecen con relativa alta frecuencia lluvias básicas.

Los valores de pH por encima de 5,6 al sur de la Habana, pudieran estar influenciados por la intensa actividad de laboreo a que se encuentra sometida esta región como fuente principal de productos agrícolas para la capital del país.

A partir de la estima de la Acidez de Entrada en la Lluvia (pA1) que representa el pH hipotético de la lluvia si no hubiese ningún tipo de neutralización, López (2006) pone de manifiesto que en una parte importante del territorio cubano aparecen valores de acidez fuerte (4,11 - 4,4), muy fuerte (3,81 - 4,1) e incluso en otras valores de acidez extremadamente fuertes ($< 3,8$). Lo que prueba la incidencia de los proceso de neutralización de los ácidos fuertes.

También es significativo señalar que existe una zona con menores valores de acidez y que se vincula, en cierta medida, a la región ubicada entre las provincias de Granma y Las Tunas en la que se ha observado una reducción sustantiva de los totales anuales de lluvia.

En el occidente del país la neutralización de ácidos es por lo general entre débil y moderada salvo una pequeña porción del territorio al sur de la ciudad de La Habana que se manifiesta entre fuerte y muy fuerte. Existe una zona montañosa de la provincia de Pinar del Río que presenta una situación de neutralización moderada, lo cual puede convertirse en un aspecto no favorable para los bosques que en ella se asientan, de continuar reduciéndose. Por el contrario en Sancti Spíritus ocurren procesos fuertes de neutralización de los ácidos (aspecto favorable para los bosques en las montañas del Escambray) (López, 2006).

Cuando se realizan Análisis Multivariantes de datos de composición química de muestras de agua de lluvia, los componentes principales que se encuentran suelen corresponder a los diversos factores que la determinan. Así, Spanos (2002) encuentra tres ejes que se corresponden con la influencia marina, los aerosoles de origen edáfico y las emisiones antropogénicas, respectivamente. Carratalá *et al.* (1996) determinan un primer eje asociado con la influencia marina y los nitratos, y una segunda componente correlacionada positivamente con los hidrogeniones y negativamente con la concentración de calcio. En este caso en el primer eje se combina el efecto de los aerosoles marinos con el hecho de que una gran parte de la actividad industrial y agrícola del área estudiada (la Comunidad Valenciana) tenga lugar en una estrecha franja costera. La segunda componente separa las muestras con mayor acidificación de origen antrópico de las que están más influenciadas por los factores edáficos.

El efecto de las ciudades sobre la acidez de la lluvia que en ellas se recolecta se puede manifestar en distintos sentidos. Así por ejemplo en una de las áreas metropolitanas de mayor densidad de población y actividad industrial como es la de Tokio, los valores medios de pH son claramente ácidos y oscilan entre 4,23 y 4,62 (Okuda *et al.* 2005).

En la Ciudad de La Habana, (estación Santiago de las Vegas), aparecen con relativa alta frecuencia lluvias básicas. También se manifiestan valores de pH por encima de 5,6, al sur de la Habana, pudiendo estar influenciado por la intensa actividad de laboreo (López 2006).

Por el contrario se han referenciado diversos casos en que las áreas urbanas o suburbanas recibían lluvias más alcalinas. Así Wang y Deng (2001) se refieren a una ciudad en China con numerosas emisiones de SO_2 con el predominio de aerosoles terrígenos alcalinos y unas determinadas condiciones meteorológicas que no permiten que se manifiesten lluvias ácidas, y el valor de pH medio anual es de 5,8. Es interesante destacar que si existe una manifestación estacional de acidez que coincide con el invierno y el funcionamiento de calefacciones con carbones ricos en azufre.

En la ciudad de Atenas se han citado valores de pH entre 7,0 y 7,5, sin ninguna correlación entre el pH y las concentraciones de SO_4^{2-} y NO_3^- , y se supone que el polvo dominado por carbonato cálcico, de la ciudad y sus alrededores, actúa como un agente neutralizador de la acidez esperable en estas áreas (Kita *et al.* 2004).

También en la comparación entre áreas suburbanas y rurales, en una provincia de la India se ha puesto de manifiesto que mientras en la zona más habitada el 93 % de las lluvias tienen pH alcalino, en las áreas rurales solo el 57 % de las muestras presenta valores de pH superiores a 5,6 (Das *et al.* 2005).

No solo a nivel local se ponen de manifiesto los efectos neutralizadores de la acidez debidos a aerosoles terrígenos y así, trabajos como los de Kulshrestha *et al.* (2001) Larssen y Carmichael (2000) ponen de relieve la existencia de procesos de mucha mayor magnitud que afectan la acidificación de áreas importantes en países como India y China.

Con toda la información existente sobre Cuba no se puede aducir para explicar la neutralidad de los pH de agua de lluvia de la ciudad de Pinar del Río, la existencia de procesos a gran escala, sino que habría que pensar en alguna fuente local de aerosoles de origen edáfico que compensan la acidez.

En esta investigación reciente de la probable acidificación en tres estaciones de la Provincia de Pinar del Río el método de muestreo difiere del utilizado por López (2006) en su estudio, ya que mientras que en él se colecta deposición

húmeda, en este caso se recoge deposición global que tiene mayores posibilidades de incorporar componentes neutralizantes en la deposición seca.

7.4. Conclusiones:

- En la estación Amistad la deposición global tiene un carácter ácido, estando el 78,2% del número de lluvias por debajo de 5,6 de pH.
- El 74,8% del volumen de precipitación, se corresponden con los pH menores de 5,6 en la Estación Amistad.
- Se comprueba que existe una relación significativa entre los volúmenes de lluvia recolectada y la concentración de hidrogeniones, en el sentido de que las precipitaciones más caudalosas tienden a tener menores valores de pH.

CAPITULO 8.- HIDROQUIMICA DEL ESCURRIMIENTO: TENDENCIA A LA ACIDIFICACIÓN.

8.1. Introducción

Las investigaciones del equipo del Instituto Nacional de Meteorología de Cuba que están bien compendiadas en López (2006), ponen claramente de manifiesto la existencia de deposición húmeda ácida, en gran parte del país. Más recientemente Morejón (2009) ha detectado procesos de acidificación de los suelos de tres cuencas de la provincia de Pinar del Río.

En el capítulo anterior se aportan observaciones de la deposición total en tres estaciones de esa misma provincia, y en dos de ellas, entre ellas La Amistad, en las que un porcentaje mayoritario, tanto de días de lluvia como de volumen de precipitación, se deben considerar ácidos.

Los objetivos del presente capítulo son los siguientes:

- Valorar las características químicas del agua de escurrimiento de la cuenca testigo en relación con otras aguas superficiales de la provincia de Pinar del Río.
- Analizar la evolución de los parámetros químicos del agua de la cuenca testigo que indican la existencia de procesos de acidificación en los suelos y verificar el mismo comportamiento en las otras tres cuencas del complejo La Amistad.

Respecto a lo indicado hasta el momento, en este capítulo se pretende verificar las siguientes hipótesis:

- Según las características litológicas y edáficas de la subcuenca testigo sería de esperar que tuviese un agua de escurrimiento muy poco mineralizada, en el rango inferior de los valores registrados para una serie de 18 muestras fluviales de la provincia de Pinar del Río.
- En consonancia con los valores de acidez descritos en el capítulo anterior y el resto de información sobre deposición ácida existente para el conjunto de isla de Cuba (López 2006) sería de esperar una tendencia a

la acidificación del arroyo de la subcuenca 2, y también de las restantes tres del complejo.

- Esta tendencia a la acidificación se pondría de manifiesto en regresiones lineales que mostrarían una disminución significativa de los valores de pH a lo largo del período de observación y por el contrario aumentos significativos de las concentraciones de calcio, magnesio y sulfato.

8.2. Afectaciones de la deposición ácida a las aguas superficiales: tendencias que se observan en la actualidad.

En la naturaleza existen aguas naturalmente ácidas, con valores de pH menores de 5.6 como es el caso de cuencas de cabecera cubiertas por turberas en las que la concentración de ácidos orgánicos de los arroyos que las drenan, que se caracterizan por tener aguas muy poco mineralizadas, puede conferirles esos valores de acidez (Hammerton, 1988).

Los efectos de la deposición ácida tratados en el apartado anterior produjeron, en la década de los setenta del pasado siglo, efectos negativos en las aguas de ríos y lagos de regiones como Escandinavia (Wright y Gjessing, 1976, Nilssen, 1980), Estados Unidos (Schofield, 1982, Johnson 1979), Canadá (Beamish *et al.*, 1975, Watt *et al.*, 1979), Inglaterra (Hammerton, 1988), entre otros. En el caso de los lagos, el estudio de las tanatocenosis de diatomeas de sus sedimentos ha permitido observar, en numerosas ocasiones, variaciones notables ligadas al descenso del pH (Flower y Battarbee, 1983).

El análisis de las series históricas de evolución del pH en aguas continentales plantea algunos problemas, ya que los métodos de medida de esta variable han cambiado considerablemente a partir de los años sesenta y es frecuente encontrar valores muy elevados de dicho parámetro, anteriores a esa época, que podrían ser erróneos (Kramer y Tessier, 1982). Entre las múltiples causas que pudieran sobrevalorar las estimas de pH anteriores a 1960 se citan los recipientes de muestreo que tendrían la capacidad de proporcionar cierta

alcalinidad, el cambio de metodología, la colorimétrica por los electrodos de vidrio, diferencias en las épocas y horario de muestreo, entre otros, aunque pese a todo ello, y en buena parte por los cambios biológicos originados, se acepta una disminución bastante general del pH en las aguas de lagos y ríos de los países antes citados (Havas *et al.*, 1984) más o menos acusada según las características geológicas y la cubierta vegetal de la cuenca, y su manejo, entre otros factores (Edmunds y Kinniburgh, 1986). Así pues, es poco frecuente encontrar en la literatura científica gráficas de tendencia creciente de la concentración de hidrogeniones, y en la misma cuenca testigo de la estación experimental de Hubbard Brook, cuyo control se inició en 1964, no es posible apreciar un claro incremento de la acidez durante los primeros años de observación (Likens y Bormann, 1995). Más frecuente es, sin embargo la comparación de medidas realizadas entre los años 1940 y 1950, en series de lagos o ríos con nuevas estimas llevadas a cabo a partir de 1970, que permiten apreciar a Brakke (1976) que en Noruega se pasó de un valor medio de pH de 7,5, en 1941 y en una serie de 21 cuerpos de agua, a valores entre 5,4 y 6,3 al principio de los años setenta. Idéntico fenómeno se pudo observar en la región de las montañas de Adirondack (estado de Nueva York, Estados Unidos) (Schonfield, 1976) y en Nueva Escocia (Canadá) (Thomson *et al.*, 1980).

La disminución de la deposición atmosférica de sulfato no marino, como consecuencia de mejoras tecnológicas en el tratamiento de carbones y también por avances legislativos en el campo del medio ambiente, que viene bien documentada en el apartado anterior, parece haber ocasionado la puesta en marcha de un proceso inverso al que se acaba de describir, de acidificación de las aguas continentales. La cuenca testigo de Hubbard Brook, representa uno de los ejemplos más evidentes en el que a la tendencia al descenso de las entradas de sulfato con la precipitación el escurrimiento responde con decrementos significativos, a lo largo del período, de la concentración de hidrogeniones, sulfato y cationes básicos como calcio y magnesio (Likens y Bormann, 1995). En una serie de diez arroyos en Escocia, Soulsby *et al.*, (1995) encuentran una disminución de la concentración de sulfato, un incremento de la alcalinidad y una recuperación de las comunidades de

invertebrados más sensibles al descenso del pH. En tres arroyos de la región montañosa del estado de Nueva York se hicieron observaciones muy similares en el período comprendido entre 1991 y 2001. Como en este caso tanto el pH como la alcalinidad, denominada con las siglas en inglés ACN (Acid-neutralizing capacity) están correlacionadas inversamente con el caudal, se analizan, tanto las tendencias de pH y ACN como los residuales de la regresión entre ellos y el caudal, pero no se puede atribuir, ninguna de ellas, al descenso estimado de la deposición de sulfato con la lluvia (Lawrence *et al.*, 2004). Como contraste, en el mismo estado de Nueva York, Burns *et al.* (2008) encuentran con un análisis estadístico de tendencias que el pH del río Neversink se incremento 0.01 unidades al año en el período comprendido entre 1987 y 2003.

Uno de los problemas que interfieren en la recuperación de los valores de pH de algunos ríos y lagos es que, paralelamente a la disminución de la concentración de sulfato no marino en la deposición global se puede observar un descenso de los contenidos en cationes básicos, elementos que están asociados al azufre en las cenizas de las grandes centrales térmicas (Summers, 1995, Likens *et al.*, 1996, Keller *et al.*, 2007).

Dos de las visiones más integrales del proceso de recuperación de las aguas continentales tras décadas de acidificación son las que proporcionan Stoddard *et al.* (1999) para el conjunto de Norteamérica y Europa y la de Evans *et al.*, (2001) solamente para Europa. El primero de ellos analiza el estado de 205 ríos o lagos de ocho regiones de América del Norte y Europa, en el período comprendido entre 1980 y 1995. En todas las regiones, salvo en Gran Bretaña, se aprecia una tendencia a la disminución de la concentración de sulfatos, más acusada a partir de 1990. La recuperación de la alcalinidad se observa en todas las regiones de Europa consideradas pero solo en una de las cinco analizadas en Norteamérica. La investigación de Evans *et al.*, (2001) se centra en 56 aguas superficiales de Europa de las que existen registros desde 1980. En 38 de ellas se observa una tendencia significativa a la disminución de la concentración de sulfato, si bien en dos de ellas se detecta un incremento. En 26 de estas aguas se aprecia un decremento de cationes básicos, sobre todo de calcio. El aumento de la ACN va acompañado de incremento de pH y

descenso de la concentración de aluminio. Sin embargo la disminución de la concentración de hidrogeniones solo mostró una tendencia significativa en 19 de las 56 aguas europeas prospectadas. En conjunto se puede decir que aunque la disminución de aportes atmosféricos de sulfato si trae consigo un descenso de la concentración de este anión en la mayoría de los casos, la recuperación de la alcalinidad, y sobre todo la del pH se produce con mayor lentitud (Driscoll *et al.*, 1998). En una serie de 603 puntos de agua de pequeñas dimensiones de Ontario (Canadá), en un área sensible a la lluvia ácida, Mc Nicol *et al.*, (1998) encuentran que aunque en alrededor del 50 % se ha producido disminución en la concentración de sulfato, solo en un 26 % aproximadamente se da una recuperación de ACN y del pH. En el caso concreto del lago Plastic, también en la región de Ontario, después de 20 años de constatada la tendencia a disminuir de la deposición de sulfato y se mantiene la disminución del cociente Ca/Al de algunos de sus arroyos (Watmough *et al.* 2007).

Menos abundantes son las investigaciones que ponen de manifiesto la tendencia contraria, y que, lógicamente corresponden a países en los que se está produciendo un incremento de la deposición ácida, y en los que resulta posible observar un descenso, continuado en el tiempo, del pH de algunas aguas superficiales. Entre ellas, Yamada *et al.*, (2007) destacan un ligero incremento, desde 1988 hasta 1997, de la concentración de hidrogeniones en algunos de los cursos de agua que vierten a un conjunto de cinco lagos en un área industrial de Japón, país que junto con China, sufre en estos últimos años los efectos de las lluvias ácidas (Larssen *et al.*, 2006, Ikeda y Hamada 2001)

8.3. Características químicas del agua del escurrimiento.

Las aguas fluviales de América del Sur son, junto con las de Australia, las menos mineralizadas del mundo (69 y 59 mg L⁻¹ respectivamente) según datos de Livingstone (1963) que resume en una tabla la composición química media de los iones mayoritarios, en los ríos de todo el planeta. El valor medio para todo el conjunto de los ríos sería de alrededor de 120 mg L⁻¹.

La composición química del agua que drena una cuenca depende de las características geológicas y edáficas de la misma, del tipo y edad de la vegetación que la cubre, de los aportes atmosféricos del entorno (aerosoles marinos, contaminación industrial, etc.) y, para características similares, el grado de mineralización se relaciona mucho con la proporción de la precipitación anual (P) que se convierte en escurrimiento (Q). El cociente Q/P es normal que se correlacione negativamente con la suma total de iones disueltos, cuando se comparan cuencas con litologías, suelos y vegetaciones semejantes. La cuenca testigo de Hubbard Brook tiene una concentración iónica total de $13,7 \text{ mg L}^{-1}$ y un cociente Q/P de 0,63 (Likens y Bormann, 1995), la microcuenca TM9 del Montseny (Barcelona) una concentración de $51,7 \text{ mg L}^{-1}$ y un cociente Q/P de 0,35 y en la microcuenca de l'Avic en la sierra de Prades los valores respectivos son $405,5 \text{ mg L}^{-1}$ y 0,08 (Avila *et al.*, 1999, Piñol *et al.*, 1999).

En lo que se refiere a la composición química de las aguas de los ríos del occidente de Cuba, el mayor volumen de información se encuentra en dos informes no publicados (Gogolev inédito a y Gogolev inédito b) que reúne datos de 18 estaciones de aforo de los principales ríos de la provincia de Pinar del Río de un período que va desde 1966 hasta 1979.

En la tabla 8.1 aparece un resumen de toda esa información pero solo con los datos de mineralización total y exportaciones de iones disueltos en kg ha año^{-1} . Las agua de estos ríos según el responsable del informe se pueden clasificar como pertenecientes a la clase hidrocarbonatado – cálcicas con predominio de los iones bicarbonatos sobre la suma de calcio y magnesio, poco mineralizadas, de reacción neutra (oscilaciones absolutas de pH de 6,3 hasta 8,7). De forma general en el período seco la mineralización de estos ríos varía de 100 hasta 500 mg.L^{-1} y en lluvia de 40 hasta 200 mg.L^{-1} .

Tabla 8.1. Valores de mineralización total y exportaciones de iones disueltos en kg.ha⁻¹.año⁻¹

Ríos - Cierre	Mineralización mg.L ⁻¹	Índice de Esguerrimiento de lones kg.ha ⁻¹ .año ⁻¹
Cuyaguaje - V Aniversario **	216	1670
Cuaguaje - La Güira **	222	1750
Cuyaguaje - Portales II **	188	1380
San Juan y Martínez - El Tabaco **	67	616
Guama - Hoyo del Guamá **	130	1050
Ajiconal - 8 de Marzo **	94	640
Paso Viejo - La Conchita **	94	689
Hondo – Pilotos **	57	428
Hondo - Fca Ramírez **	148	788
San Diego - Los Gavilanes *	240	1320
San Diego - Paso Quemado *	300	1690
Los Palacios - Fca El Rosario *	315	2950
Bacunagua - Santo Domingo *	295	2900
San Cristóbal - La Campana *	320	3030
Santa Cruz - Santa Ana *	325	4560
Taco Taco - El Jardín *	300	4490
Caimito - El Central *	258	2770
Maní - Maní - Martínez de Guajaibón *	295	3110

El rango de mineralización en las aguas muestreadas en esos 18 cierres de cuenca oscila entre 57 mg L⁻¹ en Hondo-Pilotos y los 325 de Santa Cruz-Santa Ana, que dan también el mínimo y el máximo de los valores anuales de denudación química 428 kg ha⁻¹año⁻¹ en el primero de ellos y 4560 en el segundo.

8.4 Resultados y discusión.

8.4.1. Caracterización hidroquímica.

Según se puede observar en las tablas 8.2 y 8.3 en la subcuenca C2 (bosque natural) durante el período 1983 - 1988 y 1989 - 1992, el pH tuvo valores

promedio de 6,6 a 6,7; los iones disueltos en el agua fueron del rango de 162,5 a 290,6 kg ha⁻¹. Hay que destacar que los aniones se comportaron para el bicarbonato en el rango 60,9 a 107,5 kg ha⁻¹, para los sulfatos entre 19,3 a 23,5 kg ha⁻¹ mientras que los cloruros fue del orden de 33,8 a 32,0 kg ha⁻¹. En el caso de los cationes el Ca⁺⁺ se comportó 15,8 a 32,0 kg ha⁻¹, mientras que el Na⁺ esta de 24,5 a 47,9 kg ha⁻¹ y el que en menos nivel se encuentra es el Mg⁺⁺ que está entre 3,9 a 9,7 kg ha⁻¹.

Tabla 8.2. Promedios del período 1983 – 1988 (arrastre en kg ha⁻¹ y mg L⁻¹ ón).

Subc. N°.	pH	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	Total
		Kg ha ⁻¹						
1	6,7	101,7	70,4	12,6	31,5	6,0	39,1	264,8
2	6,6	107,5	74,2	19,3	32,0	9,7	47,9	290,6
3	6,9	276,2	76,6	21,2	89,8	14,9	48,0	526,7
4	6,7	105,7	75,5	25,9	26,5	9,8	46,3	289,7

Subc, N°.	pH	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	Total
		mg L ⁻¹						
1	6,7	22,2	15,9	4,4	6,7	1,3	8,5	58,0
2	6,6	26,7	15,2	3,2	6,0	1,9	9,7	63,2
3	6,9	54,3	11,5	3,2	16,1	2,1	8,4	98,2
4	6,7	19,7	16,1	4,2	4,8	2,1	9,1	56,0
máximo deseable	6,5	100	200	200	75	30	20	-
máximo permisible	6,5	100	250	400	200	150	50	-

Tabla No 8.3. Promedios del periodo 1989 - 1992 (arrastre en Kg ha^{-1} y mg L^{-1})

Subc. N°.	pH	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	Total
		Kg ha^{-1}						
1	6,9	50,4	28,1	17,6	23,9	3,5	13,6	137,1
2	6,7	60,9	33,8	23,5	15,8	3,9	24,5	162,5
3	7,0	73,4	32,0	10,1	24,3	6,3	14,1	160,2
4	6,9	61,1	32,8	11,3	13,4	4,3	12,9	145,9

Subc. N°.	pH	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	Total
		mg L^{-1}						
1	6,9	30,1	20,6	5,4	8,8	3,3	8,7	77,2
2	6,7	34,3	18,1	7,4	8,5	3,7	9,3	81,3
3	7,0	56,5	15,9	2,9	17,3	4,3	6,6	103,7
4	6,9	34,1	14,8	5,9	8,6	3,1	9,8	76,2
máximo deseable	6,5	100	200	200	75	30	20	---
máximo permisible	6,5	10	250	400	200	150	50	---

8.4.2. Denudación química de las microcuencas.

En la tabla 8.4 se han resumido los resultados de exportaciones solubles de las cuatro microcuencas para los tres años del seguimiento. Hay que señalar que como solo se efectúa la toma de una muestra mensual para su análisis químico, como valor de caudal no se ha tomado el del día de muestreo, sino, el valor medio correspondiente a las observaciones del limnógrafo de todo el mes. Es pertinente destacar, por una parte los altos valores de solutos correspondientes al año 1983, que fue extraordinariamente lluvioso y produjo un importante caudal de escurrimiento en todas las cuencas, y por otra el elevado valor medio de la cuenca sometida a una tala rasa total (C3).

Tabla 8.4. Exportación de elementos y sustancias solubles en las cuatro microcuencas.

Cuencas	Años	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Total
		kg ha ⁻¹ .año						
cuenca 1	1983	246,1	133,2	40,5	74,3	12,7	85,2	591,9
	1987	44,4	24,8	3,8	12,1	1,9	14,0	100,9
	1988	97,0	53,2	11,4	26,0	6,5	33,8	228,1
		129,2	70,4	18,6	37,5	7,0	44,3	307,0
cuenca 2	1983	319,8	143,6	54,8	73,8	16,4	117,4	725,8
	1987	107,1	51,5	5,7	21,6	6,0	29,9	221,8
	1988	72,0	42,3	13,1	18,8	6,9	27,0	180,1
		166,3	79,1	24,5	38,1	9,8	58,1	375,9
cuenca 3	1983	600,4	157,3	46,5	162,4	29,5	100,6	1096,8
	1987	208,8	45,9	6,0	58,4	9,3	24,6	353,1
	1988	215,2	54,6	11,7	58,8	12,0	28,8	381,1
		341,5	86,0	21,4	93,2	17,0	51,4	610,3
cuenca 4	1983	171,3	119,9	46,9	41,5	15,3	77,6	472,5
	1987	52,4	37,0	8,8	11,2	7,9	22,7	140,1
	1988	68,8	42,8	16,1	12,8	6,8	29,4	176,7
		97,5	66,6	23,9	21,8	10,0	43,2	263,1

8.4.3 Existencia de procesos de acidificación.

En la década de los 50 se empiezan a evidenciar los primeros efectos de la masiva emisión a la atmósfera de gases (especialmente el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno) que tienen un elevado poder acidificante. A partir de los años 70 empiezan a publicarse diversas investigaciones que evalúan los efectos de la lluvia ácida sobre ecosistemas terrestres y acuáticos (Hutchinson y Havas, 1980; Renberg, 1987; Laws, 1993; Hällbacken y Tamm, 1986). Sin embargo, desde entonces, en los países industrializados, que fueron los que más sufrieron este impacto inicialmente, se han coordinado esfuerzos de modernización industrial con nuevas leyes de protección ambiental, que han permitido revertir el proceso en la mayoría de ellos (Berger, 1988; Houmand y

Andersen, 1995 y Likens y Bormann, 1995). Por el contrario, países en vía de desarrollo especialmente en Asia, pero también en América y África, el incremento de los procesos de acidificación es patente (Foell, 1995; Larssen, 2006; Vallory, 1999).

En el caso de Cuba la situación de este problema de contaminación de la atmósfera, ha sido descrita por López (2006), y la existencia de la acidificación concreta en suelos Lithosoles, de tres cuencas del occidente cubano, la señalan Morejón *et al.*, (2009).

La serie histórica de los valores de pH del agua de las microcuencas de la Estación Amistad, constituye una información sumamente interesante para comprobar la existencia de tendencias en el comportamiento hidroquímico de los arroyos. Como era de prever por la información existente ya mencionada, la evolución química de las aguas de escurrimiento es exactamente la contraria a la encontrada en diversos lugares de Europa y América del norte en los que el proceso de acidificación se ha invertido. En las gráficas de las cuatro cuencas se observan disminuciones significativas del pH en tres de ellas, y los consiguientes incrementos en las concentraciones de los cationes calcio y magnesio y también del anión sulfato, salvo en la cuenca 4.

Como ya se ha indicado en el apartado anterior, para el período de observación de la acidez de la lluvia, en la Estación La Amistad se han calculado unos aportes de acidez de $0,185 \text{ keq ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ que se consideran muy bajos (López *et al.* 1998). Con los datos de hidroquímica de la misma estación y que corresponden al mismo período de observación, se ha estimado una exportación de $0,083 \text{ keq ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ en la cuenca testigo por lo que se puede calcular una tasa de acumulación de hidrogeniones de $0,102 \text{ keq ha}^{-1}\text{año}^{-1}$,

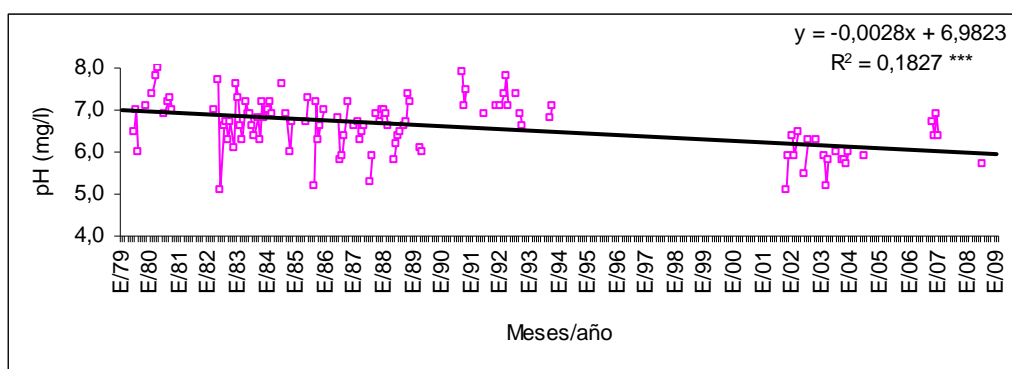
La tendencia contraria ha sido descrita entre otros lugares, en los arroyos de Hubbard Brook (Likens & Bormann 1995, Likens 2002 & Palmer 2004), en una serie de cuencas de Inglaterra (Tipping *et al.*, 2000), en cuencas noruegas (Kirchner y Lydersen, 1995) y en los Vosgos franceses (Probst *et al.*, 1995).

Los aumentos de la concentración de cationes como calcio y magnesio se producen por el desplazamiento de iones hidrógenos en el complejo de cambio

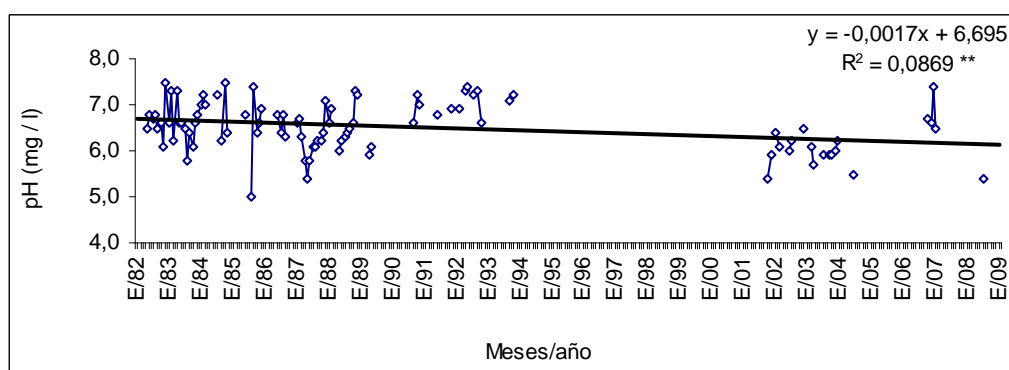
de los suelos, (Correll, 1987). La existencia de este mismo proceso se ve también en los resultados que muestran el comportamiento de las variables químicas del suelo, estudiadas en intervalos de 20 años, donde se constata una disminución de las mismas muy significativa (Morejón, 2009), en los suelos de varias cuencas de la región occidental de Pinar del río, Cuba.

A continuación se muestran las (figuras 8.1 a 8.19), que relacionan el comportamiento del pH con respecto al tiempo, así como otros elementos, en todos los casos se sigue el mismo orden (C1, C2, C3 y C4).

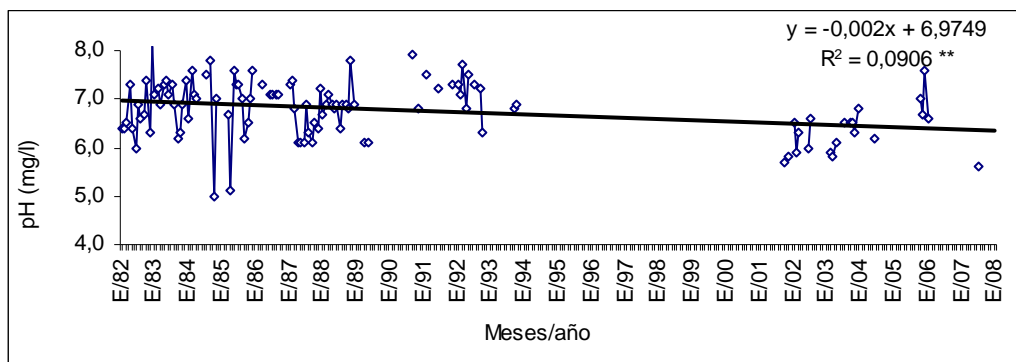
Figuras 8.1 a 8.19. Comportamiento del pH, calcio, magnesio, sulfatos y bicarbonatos, respecto al tiempo en las subcuencas (C1, C2, C3 y C4).



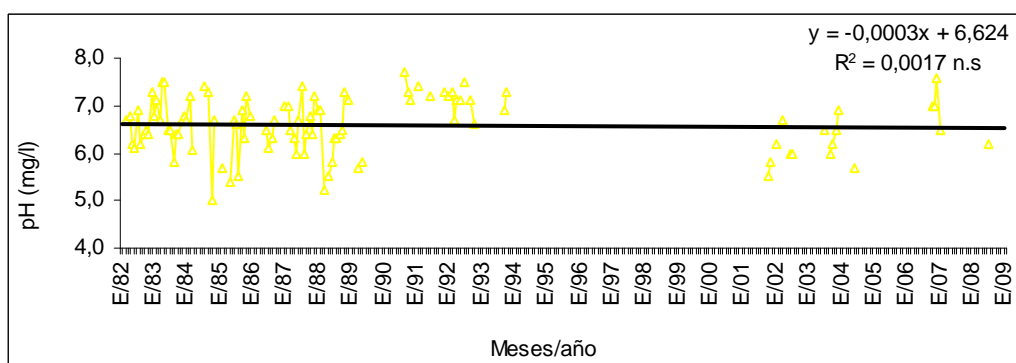
C1



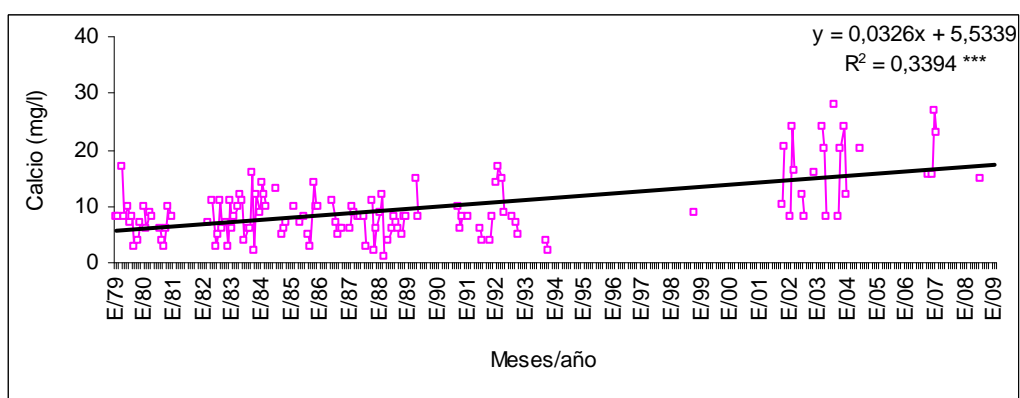
C2



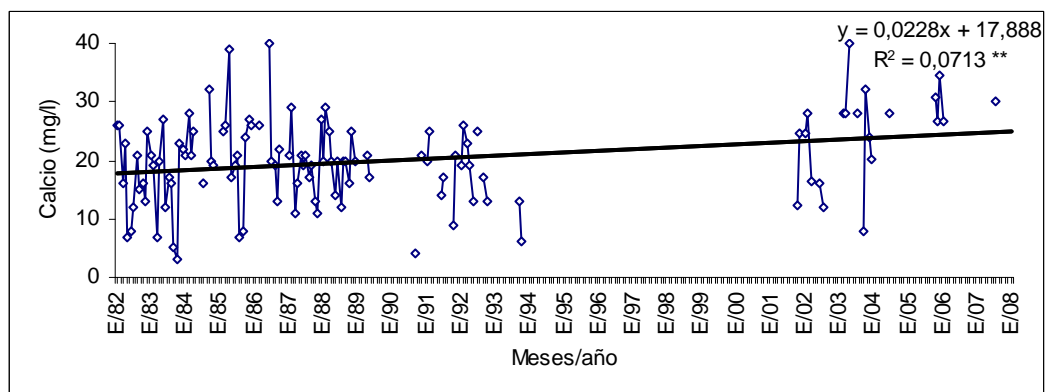
C3



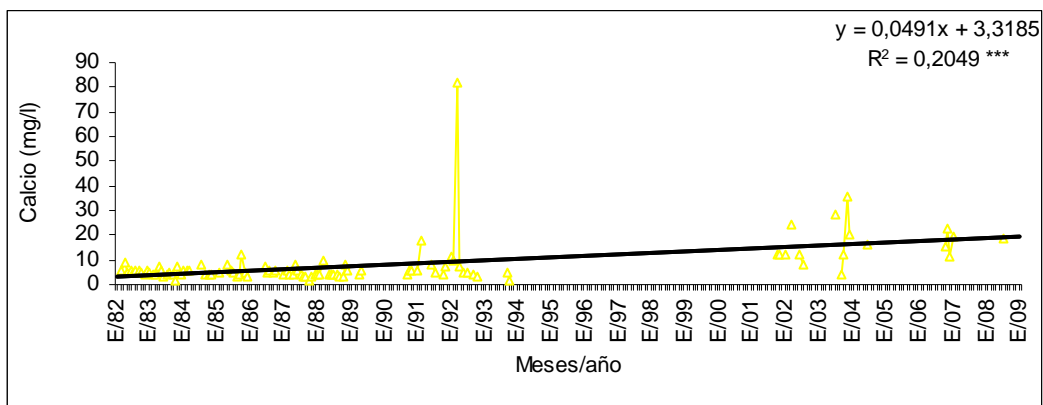
C4



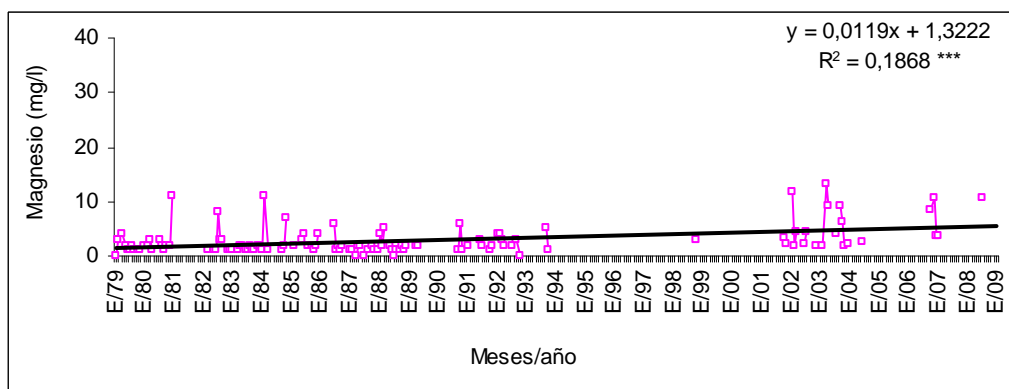
C1



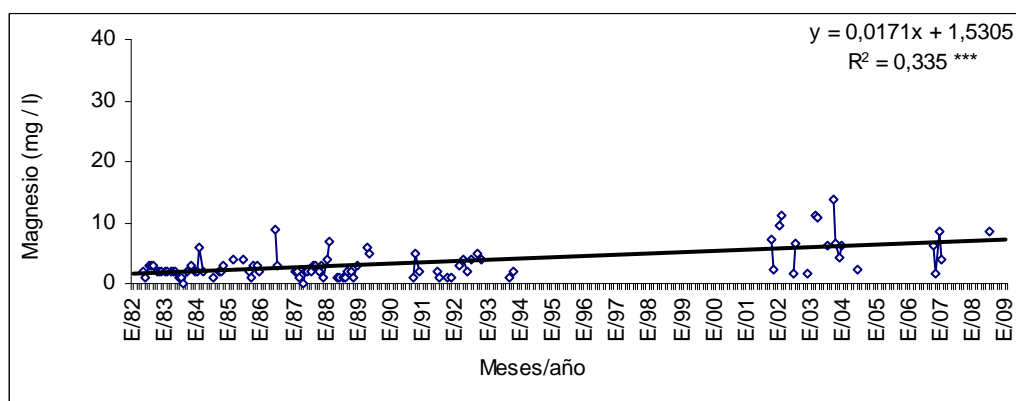
C2



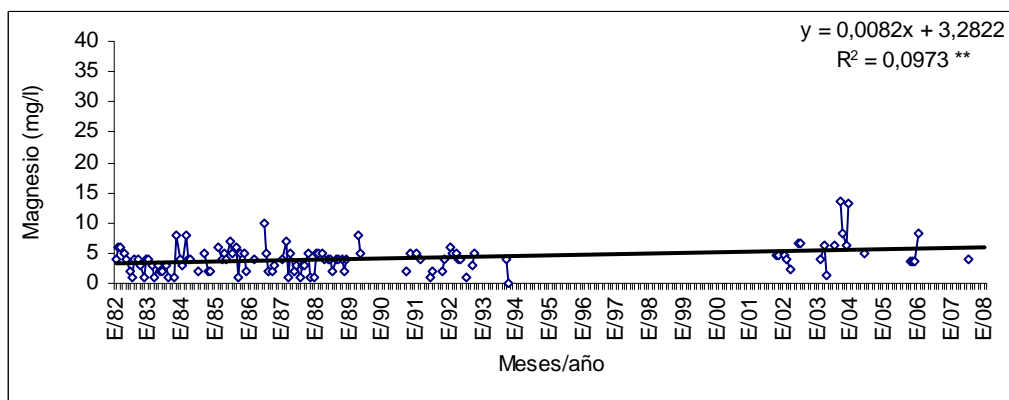
C3



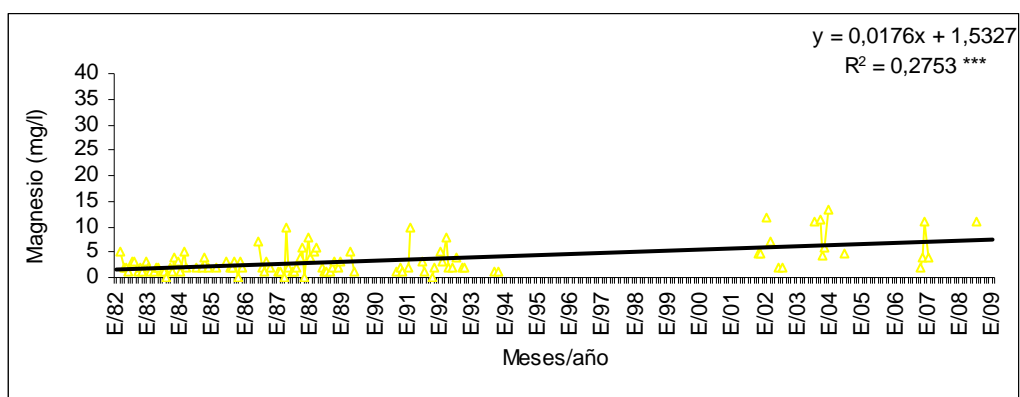
C1



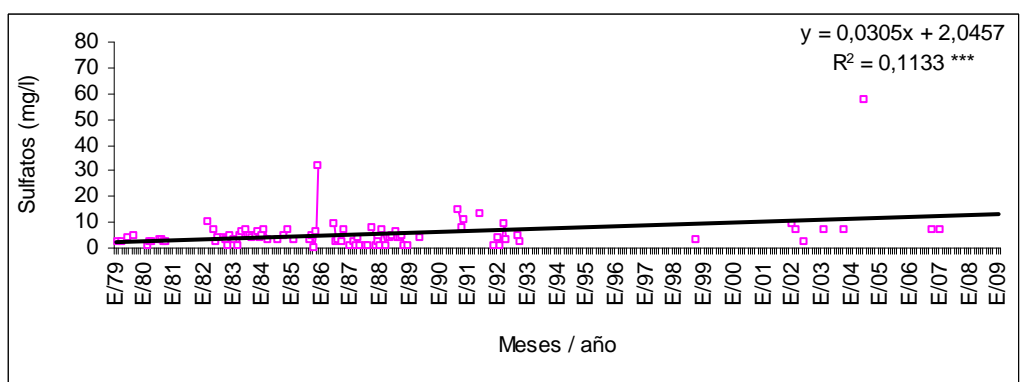
C2



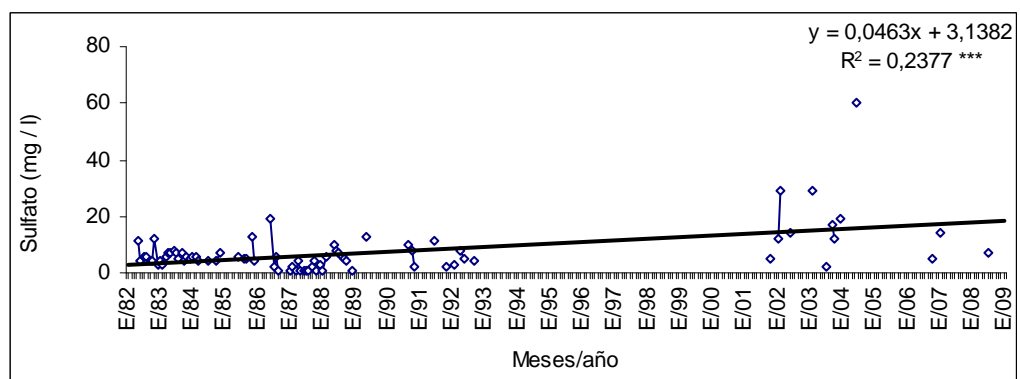
C3



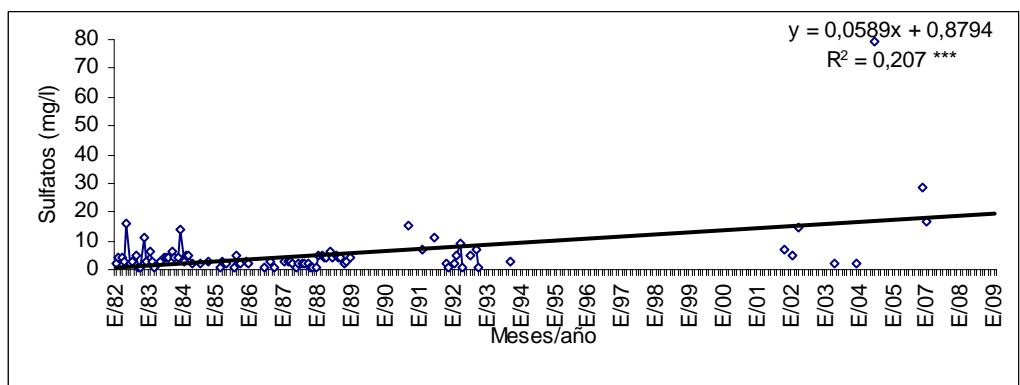
C4



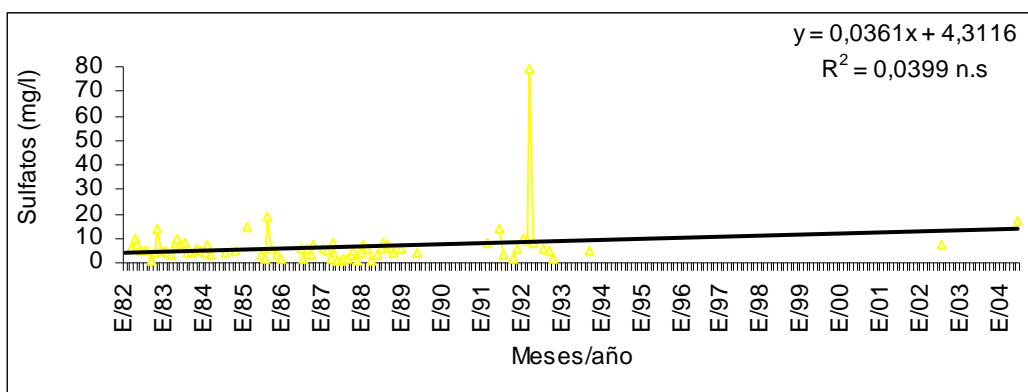
C1



C2

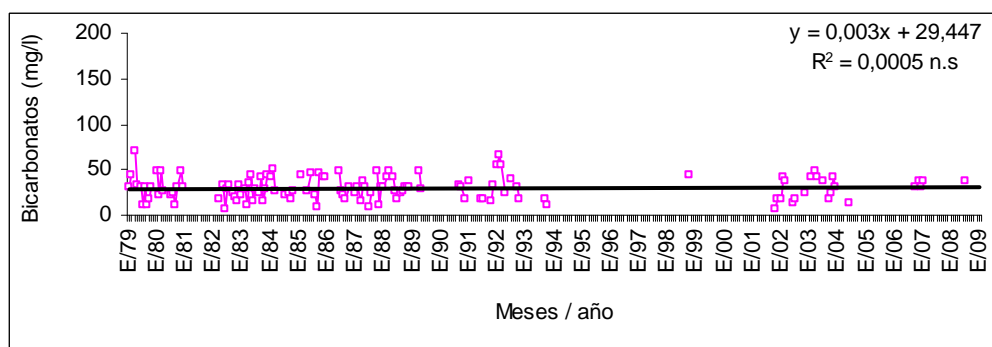


C3

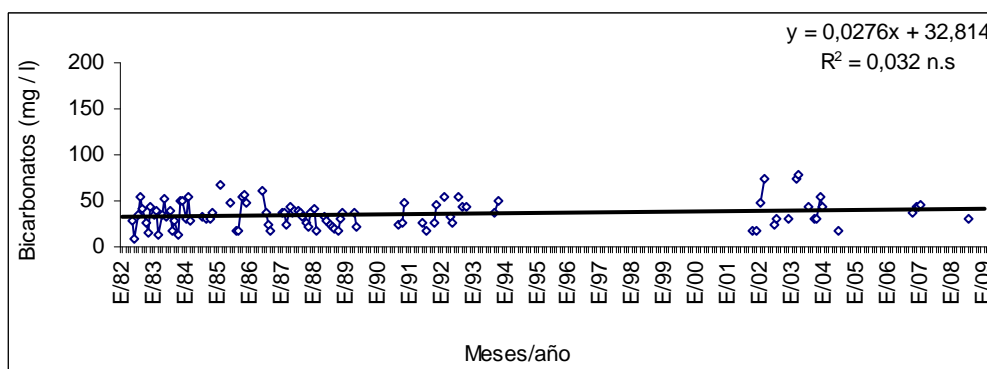


C4

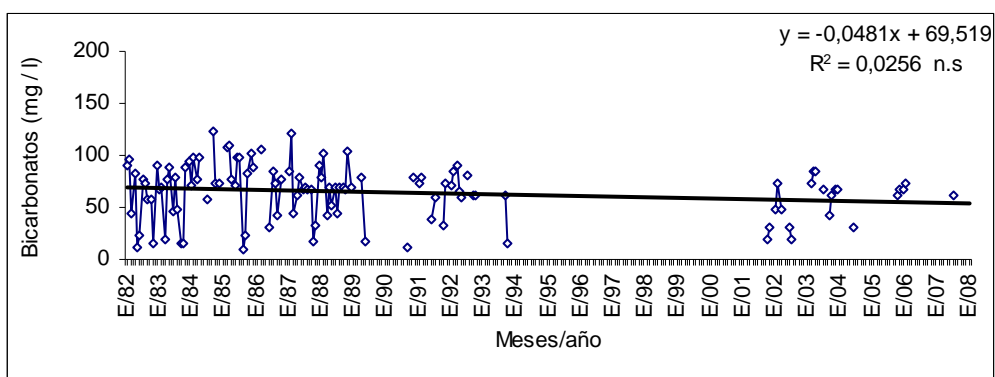
El comportamiento anómalo del pH de la cuenca 4, que no muestra tendencia alguna significativa ya ha sido analizado, y en ella se aprecia a la vez, la existencia de un incremento significativo de los bicarbonatos, que probablemente viene dado, por la aceleración del proceso de descomposición de materia muerta del suelo derivada de la tala. Este incremento de alcalinidad que se produce, junto a la supresión de la comunidad vegetal, más acidificante, pudiera compensar la deposición de azufre que en su fracción seca también se habría visto disminuida por la tala del pinar.



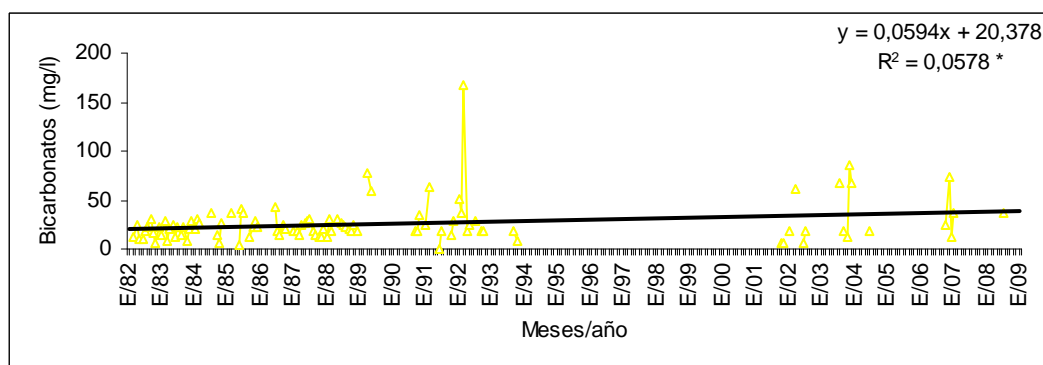
C1



C2



C3



C4

8.5. Conclusiones:

- La cuenca testigo tiene un agua de escurrimiento muy poca mineralizada con solo $72,25 \text{ mg L}^{-1}$ como promedio, en relación a las 18 muestras fluviales de la provincia de Pinar del Río con ($214,66 \text{ mg L}^{-1}$).
- Como era de esperar hay una tendencia a la acidificación del arroyo de la subcuenca 2 y sus semejantes a través de la diferencia de la estima de la deposición global ($0,185 \text{ keq ha}^{-1} \text{ año}$) y una salida de acidez ($0,083 \text{ keq ha}^{-1} \text{ año}$), obteniéndose como resultado un ingreso neto del orden de $0,102 \text{ keq ha}^{-1} \text{ año}$ de iones hidrógenos.
- Las regresiones lineales con una disminución significativa de los valores del pH y los aumentos significativos de las concentraciones de calcio, magnesio y sulfato, ponen de manifiesto la tendencia a la acidificación del ecosistema pinar.

CAPÍTULO 9.- VALORACION DE EXPERIENCIAS DE GESTION: TALA SELECTIVA, TALA RASA TOTAL Y TALA RASA CONSERVANDO EL BOSQUE DE GALERIA, RELACIONADO CON FUNCIONAMIENTO HIDRICO, QUIMICA DEL AGUA Y LA EROSION.

9.1 INTRODUCCION

La vegetación forestal tiene una marcada influencia en la cantidad y calidad del agua que se produce en las cuencas hidrográficas. Desde los primeros ensayos con microcuencas forestadas el tema de mayor interés fue la respuesta hidrológica a la supresión de la cubierta vegetal. Como ya se ha indicado, la recopilación de experiencias realizada por Bosch y Hewlett (1982) puso claramente de manifiesto que la deforestación produce incrementos del avenamiento anual, mientras que la plantación forestal tiene el efecto contrario. Más recientemente Brown (2005) hace una exhaustiva revisión de todas las experiencias de microcuencas pareadas en las que consideran cuatro tipos: a) plantaciones forestales; b) deforestación; c) recrecimiento o rebrote y d) cambio de cubierta forestal. Dos conclusiones de este estudio tienen interés aquí y son, por una parte, el especial comportamiento con alto consumo de agua que presentan los microcuencas taladas con vegetación en la que dominan las especies rebrotadoras y por otra el mayor impacto de las experiencias sobre los flujos hídricos menores. Entre las muchas experiencias de gestión, talas rasas, talas selectivas o raleos, que producen incrementos del caudal de avenamiento cabe citar las de Smith (1991) en pinares, Malmer (1992) en bosques tropicales, Lesch (1997) en raleos de bosques de pinos y eucaliptos y Lane y Mackay (2001) en bosques mixtos de eucaliptos. Stednick (1996) destaca que existen diferencias regionales, en Estados Unidos, en la sensibilidad a la remoción de parte de la vegetación, y que en unas áreas la tala de un 15 % de la superficie boscosa puede generar respuesta mientras que en otras no hay incrementos del caudal de avenamiento hasta que no se supera el 50 %.

Como es lógico, el efecto de la pérdida del bosque sobre el caudal de escurrimiento se va perdiendo a medida que se produce la regeneración de la vegetación. Además, las condiciones climáticas intervienen siempre en la respuesta, tanto a la supresión del bosque como a la implantación de la nueva

cubierta. En cualquier caso, el nivel de conocimientos actual en hidrología forestal permite hacer previsiones fiables sobre la respuesta hidrológica, en cantidad y calidad, a cualquier tipo de manejo del bosque. Sin embargo, como señala bien Calder (2007) existen ciertos mitos sobre las bondades de los bosques, falta integración de conocimientos entre los especialistas en hidrología y ciencia forestal y, sobre todo, es preciso que los gestores se esfuercen en pedir esa confluencia de saberes. En la planificación territorial es donde se precisa mayor clarividencia para hacer diseños compatibles con los recursos naturales. Sin negar la utilidad de los bosques en aspectos como la erosión y la mejora de la calidad del agua, no se puede obviar que son unos grandes consumidores de agua y que por lo tanto ocupar grandes extensiones de terreno con bosques productivos, protectores o secuestradores de carbono, puede tener un coste inaceptable en el consumo de recursos hídricos (Calder, 2007), sin negar la razón de lo expuesto por este autor es justo señalar que si balanceamos aspectos positivos y negativos de la presencia del bosque, la balanza se inclina hacia los positivos, ya que sin su presencia se rompería el equilibrio del ciclo hidrológico, ellos garantizan el aumento del tiempo de vida de los acuíferos ya sean subterráneos o superficiales. Son ya varios los trabajos que aportan soluciones concretas en esta línea de conseguir una ordenación de los montes que permita un disfrute sostenido de los recursos, entre los cuales el agua es primordial (Dye 2007; Mark y Dickinson 2008; Komatsu 2008).

En las investigaciones biogeoquímicas de cuencas se considera que con el agua de escurrimiento se produce la exportación desde la cuenca, tanto de material particulado (la erosión propiamente dicha) como de sustancias disueltas (la denudación química de los suelos). Es importante tener presente que los diferentes elementos químicos se distribuyen de manera diferentes entre ambas vías. Así por ejemplo el fósforo y el hierro se encuentran sobre todo formando parte del material particulado (Likens *et al* 1977) mientras que la exportación de potasio y azufre se hace predominantemente en forma disuelta (Lledó 1990). También las respuestas al caudal marcan claras diferencias entre ambas vías de exportación de materia ya que mientras que se obtienen buenas regresiones lineales entre el caudal de escurrimiento y los valores de exportación disuelta de los diferentes iones, no ocurre lo mismo en el en la que

predominan relaciones de tipo exponencial (Likens *et al* 1977; Parker y Troutman 1989, Lledó y Escarré 1985). La diferencia es debida a que mientras en los procesos de dilución, la energía cinética del agua no incrementa la cantidad de iones disponibles para el arrastre, en el caso del material particulado al aumentar la energía del agua se produce la descomposición de determinadas estructuras del suelo o de los sedimentos acumulados en las orillas del cauce lo que provoca un aumento exponencial de partículas heterogéneas de materia disponibles para el arrastre. Debido a ello el seguimiento de la exportación particulada presenta grandes picos en momentos de crecidas importantes que pueden significar altos valores porcentuales de las pérdidas durante una serie prolongada de años (Sánchez 1997). Por eso es interesante poder contar con series largas de observaciones que faciliten la comparación entre las exportaciones disueltas y particuladas.

Es importante señalar que, hasta el presente, se ha carecido de la integración necesaria, para evaluar cualitativa y cuantitativamente, los fenómenos de erosión hídrica y erosiva – gravitacionales los cuales provocan, en general, una notable pérdida de la capacidad productiva y fertilidad de los suelos. Particularmente los suelos Poco Evolucionados y Ferra líticos en ambientes de laderas son afectados por estas causas.

Existen muchas formas de erosión. La erosión por salpicadura es el proceso por el cual las partículas de suelo son separadas por el impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo. Las partículas erosionadas, las cuales pueden haber sido movidas solo unos pocos centímetro, son entonces susceptibles a un nuevo transporte pendiente abajo por el flujo superficial (erosión laminar). Ambas, erosión por salpicadura y erosión laminar son de poca importancia en la mayoría de los bosques no perturbados, pero ellas bien pueden producir cantidades sustanciales de sedimentos después de que el suelo es descubierto. Una vez esta etapa se alcanza las irregularidades topográficas conducen con frecuencia, a la concentración del flujo superficial en surcos. Si el proceso continúa por tiempo suficiente, estos surcos se profundizan y se convierten en cárcavas. El movimiento en masa es otro mecanismo de sedimentación de las corrientes, común en áreas empinadas en donde la precipitación es alta. Los deslizamientos de tierra y la erosión de la banca del río caen dentro de esta categoría, y son con frecuencia un riesgo

natural. La magnitud de la producción de sedimentos bajo condiciones de áreas forestales depende de la importancia relativa que tienen los respectivos mecanismos contribuyentes (Pearce 1986). El aporte de sedimentos a la red de drenaje, sin embargo, no significan que estos aparecerán inmediatamente río abajo. Un excepcional caudal pico puede ser necesario para lavar los sedimentos previamente depositados y llevarlos a su lugar final de depósito. Así, los efectos de los disturbios del suelo tienden a manifestarse primero pendiente debajo de la colina en forma de incremento de erosión laminar y mas tarde como incrementos de sedimentos de cuenca (Walling 1983; Bons 1990). La degradación de los suelos, y en particular la erosión, es uno de los problemas más importantes que enfrenta la agricultura cubana en la actualidad. Una serie de fenómenos naturales combinados con la acción descuidada del hombre han hecho posible que en Cuba el 40 % de los suelos presenten hoy en día afectaciones por erosión (Pérez Jiménez *et al.*, 1990).

Solo con la integración de métodos e índices de diagnóstico armonizados (cualitativos y cuantitativos), en los ambientes geológicos de formación y condiciones de uso considerados, será posible obtener resultados desde una perspectiva verdaderamente genética. De esta forma se podrá precisar en cada caso, los agentes principales que intervienen como causas, los componentes del medio geográfico (naturales y socioeconómicos), que participan como factores y que provocan el surgimiento y diferenciación espacial de los procesos y formas erosivas presentes en las ya extensas áreas de suelos erosionados del país (Febles, 2006).

Es por ello que en este capítulo se propone los siguientes objetivos:

- Determinar una vez manejados los bosques, los incrementos de los caudales en los meses inmediatos.
- Relacionar la variación de escurrimiento iónico, con la perdida de suelo y el tipo de tala.
- Determinar la erosión hídrica de la subcuenca 2 (control).
- Analizar la similitud del control relacionada al resto de las cuencas (1,3 y 4) respecto a la erosión para que la investigación se pueda efectúa por el sistema de cuencas pareadas (calibrado).
- Analizar la aceleración de los procesos erosivos del suelo de la tala total del bosque de conífera respecto a las demás tipos de tala.

Las hipótesis relacionadas con dichos objetivos son:

- De acuerdo a los manejos del bosque, se manifiesta las variaciones de los incrementos del escurrimiento en los meses inmediatos.
- El tipo de tala y la pérdida de suelo puede influir en la variación del escurrimiento iónico.
- Las particularidades de la erosión hídrica de la cuenca 2 debe estar en el orden establecido para los bosques naturales de coníferas.
- Según las características de suelo, vegetación, pendiente y los elementos climáticos e hidrométricos comunes que actúa sobre las diferentes subcuenca sería de esperar la similitud respecto al control para que las investigaciones respecto a la erosión (calibrado), sea desarrollada por sistema de cuencas pareadas.
- Según los tipos de tala puede influir en la aceleración de los procesos erosivos.

9.2 RESULTADO Y DISCUSION.

9.2.1 Cambios detectados en el funcionamiento hidrológico.

Es importante destacar que los objetivos de las experiencias realizadas en la Estación Amistad desde los años 1979 a 1984 no eran tan solo unos ensayos hidrológicos para cuantificar el caudal de agua que fluye al deforestar, sino precisamente se pretendía generar ese tipo de información referida anteriormente, que hoy se ha revelado como imprescindible en la planificación territorial, como es el caso de las respuestas en caudal, erosión y lavado de nutrientes que se producen al aplicar los tres tipos usuales de manejo forestal: la tala rasa sin y con el mantenimiento del bosque de galería, y la tala selectiva. Además, se debe tener en cuenta que las explotaciones se hicieron con el seguimiento de las normas silvícolas que, en el caso de Cuba, obligan a una inmediata plantación con la consiguiente preparación del suelo.

En la tabla 26 (anexo) aparecen los datos de escurrimiento de las cuatro microcuencas de la Estación Amistad en los años 1979 a 1981 y 1982 a 1984, respectivamente. Entre los primeros están los datos usados para el período de

calibración, y entre los segundos los empleados para comprobar los efectos del manejo.

Teniendo en cuenta que los efectos en la hidrología de cualquier manejo que disminuya la densidad del bosque se evidencian sobre todo en el primer año y se hacen cada vez menos patentes de forma logarítmica (Lee 1980), se han tomado los periodos pre y post, en cada una de las subcuencas.

Con los datos de la tabla 26 (anexo) de escurrimientos mensuales de los 36 meses iniciales se han calculado las regresiones lineales de la subcuenca 2 (C2) frente a las número 1, 3 y 4 (C1, C3 y C4). Los valores de los coeficientes de correlación obtenidos son los siguientes:

C2 vs. C1	$r = 0.991$	34 grados libertad	$p < 0.00$
C2 vs. C3	$r = 0.960$	34 grados libertad	$p < 0.00$
C2 vs. C4	$r = 0.948$	34 grados libertad	$p < 0.00$

Los valores de significación permiten abordar las experiencias por el procedimiento ya indicado de cuencas pareadas.

Un primer análisis de los resultados obtenidos en las experiencias aparece en la tabla 9,1 a partir de la utilización de un sistema de cuencas pareadas. A primera vista se aprecia que la cuenca testigo tiene avenamientos superiores o casi del mismo orden que las tres restantes. Cuando se compara la C2 vs C1 donde se hace una tala selectiva, se observa que en los 39 meses previos (periodo de calibrado), en la C1 se registró una lámina de 310.3 mm menos que en C2 que representa el 17.4 %. Posteriormente se efectuó una tala selectiva y en un periodo de 31 meses el escurrimiento fue de 405.9 mm, que son un 16.8 % respecto al control, es decir 0.6 % menos que en la etapa previa, lo que significa un incremento de C1 en relación con la control.

Tabla 9.1. Comportamiento de los escurrimientos en cuencas pareadas de la Estación Hidrológica "Amistad.

Cuencas Pareadas	Periodos	Lámina de escurrimiento (mm)				Diferencias respecto al control	
		C2	C1	C3	C4	(mm)	porcentaje
C2 vs C1	39 meses previos	1781.7	1471.4			310.3	17.4 (-)
	31 meses posteriores	2407.9	2002			405.9	16.8 (+)
C2 vs C3	29 meses previos	1628.7		1695.3		66.6	4.0 (+)
	14 meses posteriores	932.6		1106.6		174	18.6 (+)
	23 meses después ps y pt	1388.4		1435.3		46.9	3.0 (+)
C2 vs C4	33 meses previos	1764.8			1674.7	90.1	5.0 (-)
	9 meses posteriores	928.6			1062.8	134.2	14.5 (+)
	24 meses después ps y pt	1546.6			1686.9	140.4	9.0 (+)

ps = preparación de suelo y pt = plantación

Nótese que en los 29 meses previos, el escurrimiento en la subcuenca C3 está por encima en un 4 % con respecto al correspondiente a la C2; a los 14 meses posteriores a la tala, donde no se efectuaron más acciones, la lámina se incrementó en comparación con la control en un 18.6 % como resultado de la disminución de la evapotranspiración. Al comparar estos mismos 29 meses previos con los 23 meses después de las acciones de preparación de suelo y plantación, aunque el valor es positivo 46.9mm (3 %) respecto al control, disminuyó un 1 % en relación al período previo (Tabla 9.1), debido a que la infiltración de las aguas y la evapotranspiración se incrementaron como efecto de la aparición de los rebrotes, los retoños y el retorno de la vegetación nativa, incluyendo la arbórea,

Al realizar la tala total pero conservando el bosque de galería (C4), se muestra en los 33 meses previos que la lámina de escurrimiento está por debajo en 90.1 mm (5 %) respecto al control. En los nueve meses posteriores a la tala, aumentó el escurrimiento respecto al control en 134.2 mm (14.5 %). Se prepara

Tabla 9.2. Comparación estadística de los escurrimientos en cuencas pareadas para tres sistemas de manejo.

Cuencas Pareadas	Sistema de Manejo	Periodos	Fechas	Pendiente	Correlaciones
C2 vs C1	Tala selectiva	39 meses previos 31 meses posteriores	Enero 79 - Marzo 82 Junio 82 - Diciembre 84	b = 1.12 b = 1.29	r = 0.957*** r = 0.991***
C2 vs C3	Tala rasa	29 meses previos 14 meses posteriores 23 meses después ps y pt	Enero 79 - Marzo 82 Noviembre 81 - Diciembre 82 Febrero 83 - Diciembre 84	b = 0.98 b = 1.07 b = 1.08	r = 0.964*** r = 0.991*** r = 0.959***
C2 vs C4	Tala rasa, conservando el bosque de galería	33 meses previos 9 meses posteriores 24 meses después ps y pt	Enero 79 - Septiembre 81 Abril 82 - Diciembre 82 Enero 83 - Diciembre 84	b = 1.01 b = 1.11 b = 0.77	r = 0.948*** r = 0.991*** r = 0.881***

ps: preparación de suelo. pt: plantación .

el terreno y se efectúa la plantación de pino, provocando en el período de 24 meses una lámina de 140 mm (9 %) que muestra un aumento respecto al periodo previo, pero no así en relación a los 9 meses posteriores, donde disminuyó de un 14.5 % a un 9 % la lámina de escurrimiento respecto al control, probablemente a causa del tipo de preparación del terreno, el aumento de la vegetación arbustiva y la presencia del bosque de galería.

En la tabla 9.2 se observa que tanto la tala selectiva como la tala rasa se respete o no el bosque de galería, tienen como consecuencia un incremento significativo del caudal de escurrimiento. La comparación estadística entre los valores de las pendientes entre cada una de las cuencas tratadas y la cuenca testigo, antes y después del tratamiento pone de manifiesto la existencia de un incremento significativo para C1, C3 y C4 para el período más inmediato después de la experiencia, que se mantiene en el caso de la tala rasa, pero

que disminuye de manera significativa en el caso de conservar el bosque de galería en el siguiente período analizado. Sin embargo, tiene especial interés el hecho de que en las comparaciones de las fases de calibrado con las posteriores a la preparación del terreno para la plantación, mientras que en la tala rasa ambas dan un aumento significativo de escurrimiento, en la que mantiene el bosque de galería se observa una disminución del caudal como resultado combinado del aterrazamiento a curvas de nivel, ahoyado, la confección de terrazas individuales al tresbolillo, y de la conservación del bosque de latifolias.

En resumen se puede decir que las respuestas hidrológicas a las tres clases de manejo no se pueden considerar espectaculares. Además, hay que destacar que si se consideran en conjunto los treinta y seis meses anteriores y posteriores al tratamiento, no se observan diferencias significativas en las pendientes de las subcuencas gestionadas en relación con el control. Solo si se tienen en cuenta exactamente los periodos específicos de inicio y finalización de cada manejo y no se utilizan los meses que median entre ellos, se manifiestan variaciones significativas del caudal de avenamiento. Estos resultados no difieren mucho de los encontrados por Scott y Lesch (1996) en una cuenca talada y replantada, en la que apreciaron efectos mínimos en los cambios del caudal de escurrimiento.

9.2.2 EFECTOS SOBRE LAS CARACTERISTICAS QUIMICAS DEL AGUA.

El aumento del arrastre de las subcuencas resulta ser, generalmente, a expensas de los iones de H^+ , CO_3H^- y Ca^{2+} . En el periodo 83 – 88 el arrastre iónico desde la subcuenca C3 (tala rasa) asciende a 526.7 kg/ha, lo que sobrepasa en 1.8 veces los resultados obtenidos en la subcuenca C2 (testigo). A medida que se cubren las áreas taladas con vegetación arbórea y herbácea se van reduciendo paulatinamente los procesos de arrastre iónico, llegando a igualarse e incluso a disminuirse, así el acumulado promedio del periodo 89 – 92 en la subcuenca C3 fue de 160.2 kg/ha y en la testigo fue de 162.5 k/ha. En los casos de la tala selectiva y la tala rasa dejando el bosque de galería se puede apreciar que las variaciones son mínimas, comparada con la tala rasa

total, poniendo de manifiesto la efectividad de estos tipos de tala en relación a la calidad del agua.

Sobre la base de los datos de las observaciones de varios años se puede llegar a la conclusión que después de la ejecución de las talas se observa una erosión de los suelos forestales con un arrastre intensivo de sales inorgánicas, sin embargo, se debe señalar que de acuerdo a la concentración de iones en un litro, las aguas superficiales son de buena calidad y responden a la norma de las aguas potables del 19 abril de 1983 Decreto 67 aprobada por el Ministerio de Salud Pública de Cuba. Debemos recordar, sin embargo, que las aguas escurridas de la parcela 3 de balance hídrico no se encuentran dentro de estos parámetros a consecuencia de su alta concentración, llegando a ser 7 veces superior a lo permitido por la norma (en estas parcelas se llevaron a cabo cultivos anuales después de la tala durante varios años, ascendiendo por año y llegando al cuarto año a 3266 Kg/ha)

Esta problemática se estudió durante el periodo 1983-1992 en las subcuencas experimentales donde en 1982 se llevaron a cabo diferentes tipos de talas, aunque en la subcuenca 1 se comenzó en el año 79.

Los datos de las investigaciones demostraron que la mayor cantidad de sustancias químicas que caracterizan la calidad del agua se lixivian de las áreas de tala rasa y por tanto estas aguas poseen menor calidad que las que escurren de las subcuencas control y otros tipos de tala (selectiva y dejando bosque de Galería). El mayor aumento de lavado de sustancias químicas se registró en los años posteriores a la tala. Por esta razón el arrastre total de sustancias químicas (escurrimiento iónico) desde la subcuenca 3 (tala rasa) aumentó en comparación con la subcuencas 2, testigo en un 38 %

El diseño realizado para investigar los efectos que tienen los diversos tipos de gestión en la composición química de las aguas de los arroyos no corresponde estrictamente a una experiencia de cuencas pareadas al faltar un periodo previo de calibrado con la cuenca testigo. De la cuenca 1, a la que se le aplicó una tala selectiva, si se tiene un seguimiento analítico desde los primeros tiempos de su funcionamiento, pero no así de la 2, que se tomó como control,

ni de las otras dos, en las que el muestro químico se inició en mayo de 1982, después de realizadas, en las dos últimas las experiencias de gestión.

Así pues, en el caso de la cuenca 1 se compararán las características químicas de su agua de escurrimiento, desde mayo de 1982, con la de la cuenca testigo de la misma época, pero se podrá contar con los resultados de la propia cuenca antes de realizar en ella la acción de tala selectiva, ya que lo relevante son las diferencias que aparezcan entre el antes y después del tratamiento. En las otras dos cuencas, no se cuenta con el recurso al revisar la situación anterior que se daba en ellas por lo que no resultará posible apreciar si las disparidades percibidas son debidas al efecto de la gestión o simplemente originadas por diferencias intrínsecas entre las mismas

Tala selectiva.

Los valores medios de los parámetros físicos y químicos de las aguas de las cuencas testigo (C2) y de la sometida a un proceso de tala selectiva (C1) se presentan a continuación y se puede apreciar que existen diferencias significativas en las concentraciones de bicarbonato, sulfato, magnesio y sodio, y en la conductividad.

	HCO₃⁻	Cl⁻	SO₄²⁻	Ca²⁺	Mg²⁺	Na⁺	pH	Conductividad
C2	35.44 ^a	16.18 ^a	7.19 ^a	9.78 ^a	3.17 ^a	10.52 ^a	6.52 ^a	114.37 ^a
C1	28.2 ^b	15.8 ^a	5.1 ^b	9.4 ^a	2.5 ^b	9.6 ^b	6.6 ^a	98.2 ^b

Las menores concentraciones iónicas de la cuenca 1 respecto de la 2, no pueden en ningún caso justificarse por los caudales ya que en la cuenca testigo los volúmenes de avenidas son mayores del orden de 1.2 veces superiores a los de la cuenca con tala selectiva.

Sin embargo, cuando se analizan estadísticamente las tres fases de la gestión en la misma cuenca: antes de la tala, hasta dos años después y más de dos años tras la experiencia, se observa que no hay diferencias significativas entre los tres periodos en ninguno de los siguientes iones: bicarbonato, sulfato, calcio, magnesio y sodio, ni tampoco, en la conductividad. Hay que tener en cuenta que de los más de 2900 árboles existentes en la cuenca solo fueron talados algo más de 400, y al igual que ocurre con las variaciones de caudal,

tratamientos de este tipo no suelen alterar sustancialmente las características químicas del agua del arroyo (Scott y Lesch 1996; Hopmans y Bren 2007)

En el análisis de la tendencia de las concentraciones iónicas a lo largo de todo el período de estudio no se aprecia una variación significativa en la concentración de bicarbonatos. Tampoco se ve si se estudia un período más corto, hasta 1993, en el que podría esperarse que la descomposición de las raíces muertas de los árboles cortados incrementase la presión parcial de dióxido de carbono en el suelo. Aumentos de este ión por efecto de la actividad biológica de las raíces de la vegetación herbácea y arbustiva, en suelo con aportes especiales de nitrógeno, han sido citados por Parfitt (2002) en una cuenca de *Pinus radiata* de Nueva Zelanda. Por su parte Forti (2000) encuentran exportaciones altas de bicarbonato en la parte baja y alterada de una cuenca en Brasil, y lo atribuyen al aumento de meteorización que sigue a la deforestación. En el caso de los cloruros no se aprecian diferencias al poco tiempo de realizada la tala selectiva, pero el promedio después de más de dos años si que es significativamente mayor. En el análisis de la tendencia temporal de este ión se pone de manifiesto que tanto en la cuenca 2 como en la 1, hay un incremento significativo de su concentración en el agua de escurrimiento desde 1982 hasta 2008. Dado que el cloruro es un ión predominantemente de origen atmosférico, componente de los aerosoles marinos cabría atribuir el incremento de su concentración en el agua, al progresivo desarrollo del bosque que actúa como un eficaz interceptor de deposición seca (Canell, 1999). Bellot (1988) estima, en un encinar de la Sierra de Prades, con un área foliar de alrededor de 4, un valor de aportes netos de cloruro al suelo próximo a los 4.2 kg/ha/año. Este mismo autor, con el uso de colectores como los propuestos por Miller y Miller (1980) pudo medir concentraciones de cloruro 2.4 veces superiores a las registradas en los de deposición global, lo que da idea de la eficacia con que este ión puede ser interceptado por la vegetación.

Análisis del Cl en las Sudcuencas

Gestión	N	Subconjunto	
		1	2
DHS de Tukey ^{a,b,c} 1	22	13,7273	
3	26	15,1923	15,1923
4	71		16,3331
Significación		0,167	0,334

1: Antes de la gestión, 3: Inmediato a la gestión y 4: Mucho después gestión.

En la clásica experiencia de deforestación integral de una de las cuencas de Hubbard Brook, se observó un claro efecto de acidificación en el arroyo, durante casi tres años (Likens 1970, Nodvin 1988). En este caso, tanto en la cuenca 2 como en la 3, se ha visto una clara disminución del pH a lo largo del período de investigación, por lo que resulta difícil atribuir este proceso de acidificación únicamente a la gestión. Probst (1995) describen, por el contrario, incrementos de pH del agua de avenamiento en las crecidas primaverales. Nisbet (1995) mencionan un aumento del pH de una cuenca forestada con coníferas en Escocia, entre los 6 y 17 años de la plantación, pero no son capaces de precisar si es un resultado de la gestión o de la tendencia de las aguas de escurrimiento al disminuir su acidez, asociada a la disminución de la concentración de sulfatos en la deposición global.

pH				
Gestión			Subconjunto	
			1	2
DHS de Tukey a,b,c	4	66	6,5000	
	3	26	6,7192	
	1	13		7,1462
	Significación		,440	1,000

Se muestran las medias para los grupos en subconjuntos homogéneos.

Basado en la suma de cuadrados tipo III

El término error es la Media cuadrática (Error) = ,367.

- Usa el tamaño muestral de la media armónica = 22,982
- Los tamaños de los grupos son distintos. Se empleará la media armónica de los tamaños de los grupos. No se garantizan los niveles de error tipo I.
- Alfa = ,05.

Tala rasa.

Se debe insistir en que la extracción de la madera por tala rasa en la cuenca 3 se realizó entre el 26 junio y el 9 de octubre de 1981, es decir, casi un año antes del inicio del seguimiento químico de su agua de escurrimiento, por lo que muchos de los efectos previsibles como consecuencia de la gestión se supone que eran ya muy manifiestos en el primer muestreo. En esta ocasión se procedió a la corta de más de 2500 árboles, casi 2000 pinos y 520 latifolias, el

100 % de los existentes en la microcuenca. Además entre el 26 de noviembre de 1982 y el 27 de enero de 1983 se efectuó la preparación del terreno y se hizo la plantación en julio del mismo año.

Los valores promedio de las cuencas 2 y 3 como se observa más abajo difieren significativamente en todos los iones, excepto en el cloruro, y también en la conductividad. Hay que destacar que mientras que los valores de iones litofílicos, relacionados con el proceso de meteorización, son superiores en la cuenca gestionada, los sulfatos y cloruros, y también el sodio, tienen mayores concentraciones en el arroyo de la cuenca control.

	HCO₃⁻	Cl⁻	SO₄²⁻	Ca²⁺	Mg²⁺	Na⁺	pH	Conductividad
C2	35.44^a	16.18^a	7.19^a	9.78^a	3.17^a	10.52^a	6.52^a	114.37^a
C3	62.16^b	15.81^a	4.91^b	18.74^b	4.00^b	8.89^b	6.78^b	154.52^b

Los mayores valores de las concentraciones de bicarbonato, calcio y magnesio que aparecen en la cuenca tratada con tala rasa completa, sobre todo cuando el control analítico se comienza, casi un año después de iniciado el manejo, ponen de manifiesto la aceleración de los procesos de meteorización que se produce tras la tala. Al mismo contribuye especialmente el incremento de la presión parcial de dióxido de carbono como consecuencia de la descomposición de las raíces muertas. Situaciones similares son las descritas por Likens (1970) en la cuenca deforestada de Hubbard Brook y también por Forti (1990) y Parfitt (2002). Ahora bien, mientras los primeros constatan un claro descenso del pH en los años iniciales, los otros dos grupos de autores hablan de un aumento primaveral del mismo, coincidente con un ascenso de caudal. En este caso las diferencias entre las dos cuencas, aunque significativas con $p < 0.002$ se producen en coexistencia con sendas tendencias a la disminución del pH desde 1982 hasta la actualidad.

La falta de diferencia significativa en las concentraciones de cloruros no es consistente con lo esperable, si la vegetación actuase como un captador de deposición seca, ya que con la desaparición total de la cubierta, deberían acrecentarse las diferencias en mayor medida que en la experiencia de la tala selectiva, si bien es cierto, que en ese caso se comparan datos que son todos de la misma cuenca, lo que no ocurre ahora.

Para el sulfato, la importante diferencia existente, si pudiera atribuirse a la desaparición total de la bóveda forestal, aunque no hay que olvidar que en la cuenca deforestada de Hubbard Brook se hizo patente también en los primeros años (Likens 1970) una disminución de la concentración de sulfatos, que se atribuye a que el incremento de las tasas de descomposición de la materia orgánica, junto con el descenso del pH, facilitan la adsorción de sulfato por los minerales del suelo (Likens 2002). Según Lindberg y Garten (1988) del sulfato que se recoge bajo la bóveda forestal, hasta un 85 %, puede provenir de la deposición seca interceptada por ella. En el bosque de encinas de la Sierra de Prades, Bellot (1988) calcula unos aportes netos de sulfato con la trascolación de 12.6 kg/ha.año, cantidad algo menor que la que estima Lledó (1990) para la exportación disuelta desde la cuenca de l' Avic (17.4 kg/ha.año).

En el caso concreto de los pinares, Fernández (1997) en un estudio de la trascolación de *Pinus sylvestris*, dan cuenta, de un enriquecimiento notable de sulfato junto a cationes básicos e hidrogeniones. Singer (1996) encuentran, al investigar este mismo proceso biogeoquímico en el pino carrasco, aportes de 38 kg/ha año de azufre, mientras que en una especie del género *Quercus* es solo de 18 kg/ha año, una diferencia considerable que se atribuyen al mayor índice foliar de los pinos. También Park (1999), en un pino coreano, refieren que el sulfato es el ión mayoritario en la trascolación.

El sodio no presenta el mismo comportamiento que el resto de los iones litofílicos ya que tiene una mayor concentración en la cuenca testigo, en la que no se han estimulado los procesos de meteorización. Morejón (2005) indica que, al menos en parte del occidente de Cuba, este ión debe ser considerado como muy mayoritariamente de origen atmosférico, es decir, atmofílico, aspecto este sobre el que se insistirá más adelante. Su presencia en los aerosoles marinos le confiere un papel importante en la deposición seca, cuya intercepción por la bóveda forestal, produce un especial enriquecimiento en la trascolación y el escurrimiento cortical. Johnson (2005) comparan las características químicas de la trascolación de un pinar y las de un encinar, y observan que la primera está más influenciada por la deposición seca y en ella predominan las concentraciones de sodio y calcio. También Fernández (1997)

y Park *et al.* (1999) encuentran, un incremento de los cationes básicos en el flujo de agua que atraviesa la bóveda de pinares.

Tala rasa sin eliminación del bosque de galería.

En este caso se debe señalar también que el manejo se efectuó entre el 19 de octubre de 1981 y el 10 de marzo de 1982. La preparación del terreno tuvo lugar del 20 al 29 de diciembre de 1982 y la plantación se realizó en julio de 1983. Así pues, cuando se inician los análisis químicos del arroyo de esta cuenca, han transcurrido ya siete meses desde que se hizo la tala, y al igual que en la tala rasa total, es de esperar que los efectos fuesen ya patentes. Hay que indicar, sin embargo, que en esta experiencia se talaron algo más de 1900 pinos, sobre la cuarta parte del total de árboles de la microcuenca, pero se dejaron sin cortar casi 700 árboles del bosque de galería, como una franja casi intacta en la parte baja de la cuenca. Esta técnica forestal de mantener intocada, franjas de bosque en las zonas más próximas al cauce, pretende un control erosivo, pero también disponer de un filtro que mejore la calidad del agua que pudiera ser afectada por la gestión del monte.

En la comparación de valores promedios se puede ver que hay diferencias significativas en las concentraciones de bicarbonato, cloruro, sulfato y calcio, y en la conductividad, pero no en los niveles de magnesio, sodio y acidez. En esta ocasión, las concentraciones de los iones, incluidos los hidrogeniones, son siempre mayores en el agua de la cuenca testigo, que lógicamente, presenta una conductividad más elevada.

	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	pH	Conduc.
C2	35.44 ^a	16.18 ^a	7.19 ^a	9.78 ^a	3.17 ^a	10.52 ^a	6.52 ^a	114.37 ^a
C4	23.27 ^b	14.10 ^b	5.49 ^b	6.36 ^b	2.88 ^a	9.07 ^a	6.58 ^a	89.74 ^b

Conduc.: Conductividad

La interpretación de estos resultados no resulta sencilla, sobre todo si se tiene en cuenta que el caudal de avenamiento de la cuenca 4, es el menor de las cuatro microcuencas, y su carga iónica es también la más baja, lo que resulta contradictorio con cualquier supuesto proceso de dilución. En este caso, la falta

de información química sobre el agua del arroyo, antes de la gestión, imposibilita poder valorar su efecto en términos hidroquímicos.

Sorprende sobre todo la baja concentración de bicarbonato, si se compara con la cuenca 2 y en especial con la 3. La corta de casi las tres cuartas partes de los árboles, debió producir un aumento considerable de la tasa de descomposición de la materia orgánica del suelo, en especial de las raíces de los pinos con lo que sería de esperar una aceleración de los procesos de meteorización con resultados similares a los que se producen en la cuenca de tala rasa total. Ahora bien, si se analiza la evolución temporal de la concentración de bicarbonatos, y también las de los cationes calcio y magnesio, en esa cuenca (C4), a partir de 1982 se aprecia un incremento significativo del bicarbonato ($p < 0.05$) en todo el período, que no se da en ninguna de las otras tres cuencas, y también de los cationes ($p < 0.001$ en ambos). Este aumento de la alcalinidad del agua de la cuenca junto con la supresión de la comunidad vegetal más acidificante, como es el pinar, tanto por la materia orgánica que produce (Brand 1986, Lilienfein 2000), como por el enriquecimiento en hidrogeniones que se da, en el agua de su trascolación (Fernández 1997), podrían explicar que no se detecte la existencia de la misma tendencia significativa a un descenso del pH, como la que se observa en las otras tres cuencas.

Para los iones cloruro, sulfato y sodio, se constatan menores concentraciones en la cuenca 4 frente a la control, que podrían explicarse por la pérdida de capacidad de captación de aerosoles en la cuenca, después de suprimir el 72 % de la superficie de su cubierta vegetal. En dos de estos iones, cloruro y sodio, se aprecia una tendencia mínimamente significativa ($p < 0.05$) al aumento de su concentración en el arroyo, a lo largo del período de estudio, lo que podría indicar una recuperación de las posibilidades de interceptar compuestos, que sin embargo, no se llega a apreciar en la evolución del sulfato, influido quizás, por el mismo proceso que señalan Likens (2002) en Hubbard Brook.

HCO3

Gestión	N	Subconjunto
		1
DHS de Tukey ^{a,b,c} 3	26	27,2692
4	71	30,2085
1	22	30,5000
Significación		,587

Se muestran las medias para los grupos en subconjuntos homogéneos.

Basado en la suma de cuadrados tipo III

El término error es la Media cuadrática (Error) = 164,135.

- a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 30,612
- b. Los tamaños de los grupos son distintos. Se empleará la media armónica de los tamaños de los grupos. No se garantizan los niveles de error tipo I.
- c. Alfa = ,05.

9.2.3 Influencia en las tasas de erosión.

9.2.3.1 Escurrimiento sólido en la Estación Amistad, antes de los manejos.

El escurrimiento sólido de las subcuencas experimentales del área de estudio, con tamaño no mayor de 11 ha, mostró valores mucho menores a los referidos por Bruijzeel con valores promedio entre 140 y 221 kg/ha (tabla 9.3) valores de esta magnitud se consideran relacionados con el proceso de formación del suelo (estos valores son de las cuatro subcuencas ante de efectuar las talas, en estado natural (fase de calibrado), en el caso de la 2 control fue de 140 kg/ha/año), aunque otros autores plantean que la producción de sedimentos bajo condiciones de bosque natural puede ser muy diferente, dependiendo de la importancia relativa de los mecanismos de contribución respectivos (Pearce, 1986). Por ejemplo, la producción de sedimentos en suspensión de las cuencas en bosque lluvioso puede ser tan baja como 250 kg/ha/año en las áreas tectónicamente estables con suelos que no estén sujetos ni a la erosión superficial significativa ni a erosión hídrica extensa, ni a los movimientos en masa (Douglas, 1967; Malmer, 1990; Fritsch, 1992, citados por Bruijzeel, 2004)

Tabla 9.3. Erosión antes y después de la tala (kg/ha)

AÑO	PREC.	SUBCUENCAS (ANTES DE LA TALA).			
-	-	I	II	III	IV
1979	2299	342	222	256	209
1980	1902	21	57	271	169
1981	1104	58	106	161	21
PRO M.	1768	140	140	221	181
DESPUÉS DE LA TALA (PRIMER PERÍODO).					
1983	2171	1015	1028	1340	1019
1984	1557	721	263	1199	100
1985	1586	222	262	256	230
1986	1781	245	240	451	450
PRO M.	1774	551	448	812	450
DESPUÉS DE LA TALA (SEGUNDO PERÍODO).					
1987	1586	97	48	81	58
1988	1684	75	61	60	128
1989	1721	242	97	95	140
1990	1657	191	76	51	88
1991	1912	204	52	166	69
1992	1873	195	62	92	144
PRO M	1739	167	66	91	105

En los años 1979 y 1980, que se caracterizaron por su pluviosidad superior a los 1900 mm, en los cuales la frecuencia de los aguaceros fue grande y las lluvias mayores de 40 mm, que son las que producen las grandes escorrentías, constituyeron el 3.76 % y el 7.1 % de los aguaceros y produjeron el 36.5 y el 30.86 % respectivamente del total del agua recibida por las subcuencas, no así en el año 1981 en el que la lluvia fue de menor cuantía, y el proceso erosivo se relaciono con la precipitación y el escurrimiento, en este caso con respecto a la erosión fue del orden de 21-161 kg/ha/año, muy por debajo de la media para dicho periodo (140-221 kg/ha/año), todo esto nos permite concluir que las cuatro cuencas experimentales, tal como fue respecto al rendimiento hídrico, con respecto a la erosión dado el resultado del periodo de calibrado (79-81), permite utilizar el sistema de cuencas pareadas, con los resultados antes expuesto del orden de 140-221kg/ha/año, para las investigaciones relacionadas con erosión.

9.2.3.2 Efecto de las acciones de talas sobre la erosión en las subcuencas.

Como se indicó acerca del escurrimiento sólido en el pinar natural (Tabla 9.3)25, donde las pérdidas de suelo en el periodo evaluativo (1979 – 1981) fueron del orden de 140 - 221 Kg/ha por año, la erosión hídrica se consideró normal para las condiciones de Cuba.

Una vez realizada las intervenciones planificadas para cada subcuenca y llevada a cabo la preparación del suelo, así como el establecimiento de la plantación en el año 1983, se pudo constatar que en las subcuencas taladas se produjo un moderado aumento en el escurrimiento superficial lo que trajo consigo un aumento en la acción erosiva corroborándose lo planteado por Rasmanov, (1962) (citado por Molina, 1981) cuando dijo que después de las talas del bosque se intensifican los procesos erosivos.

En la subcuenca 1 (de tala selectiva) se observó que después de la tala el incremento en la erosión fue 7.5 veces superior en el primer año al ocurrido en ella misma antes de ser intervenida y se registró una perdida 1.2 veces mayor que en el control al final del periodo 83-86.(tabla 25). En la subcuenca 4 de tala rasa dejando el bosque de galería, el incremento del material erodado en comparación con ella misma antes de la tala fue 5.6 veces superior en el primer año y 1.004 veces con respecto al control, mientras que la subcuenca 3 de tala rasa total experimentó un incremento del material erodado de 6.1 veces mayor en el primer año que en ella misma antes y 1.8 veces superior al control al final del periodo. Téngase en cuenta que el año 1983 primero después de las acciones fue de muchas precipitaciones (2171 mm).

En esta misma subcuenca,(C3) el 24 de mayo de 1985 durante 30 minutos se escurrieron 92 kg.de suelo, con una altura del agua sobre el vertedor de 40 cm. (o sea en cada minuto se perdieron 3 kg de suelo), lo cual corrobora lo planteado por Herrero *et al.*, (1981) con relación a la necesidad de la existencia de fajas forestales hidrorreguladoras en las riberas de los ríos, presas y embalses del país, con vistas a atenuar los efectos negativos de la erosión, de igual forma confirma lo planteado por Sagué *et al.*, (1979) y Perera (1975) de que el bosque protege en gran medida al suelo de la erosión, ya que una vez efectuada la tala devino una erosión intensiva, que de continuar a ese ritmo provocaría el empobrecimiento del suelo en muy poco tiempo.

En el periodo (87 - 92) una vez que el bosque se va restableciendo, los procesos erosivos se van atenuando llegando a los niveles iguales e incluso por debajo a los que existían antes de las acciones Tabla 25.

Es bueno señalar que al producirse la tala del bosque y procederse a su repoblación dentro de un período de tiempo corto (1-2 años) sin alterar la cubierta gramínea-arbustiva que naturalmente se desarrolla en esos lugares, las condiciones del sitio forestal sufren relativamente poca alteración y su recuperación se observa en un plazo breve, pues, el suelo no pierde su estado de agregación debido a que el contenido de materia orgánica, acumulada bajo el dosel del bosque antes de ser talados, se mantiene en niveles (3 - 4 %) durante ese lapso, lo que no sucede cuando las áreas taladas se dedican permanentemente a las actividades agropecuarias. En este último caso, como se ha señalado con anterioridad, deben transcurrir numerosos años, después de la reforestación, para la total recuperación de las funciones hídrorreguladoras y antierosivas de los sitios forestales. Esto lo corrobora lo acontecido en las parcelas de Balance Hídrico en la Estación Amistad (Tabla 22) cuando la parcela 3 (esta parcela esta a solo unos metros de la subcuenca 3 y permitió comparar cuando un área es sometida de inmediato a la reforestación o a cultivos permanentes) fue sometida a tala rasa total y posteriormente a cultivos anuales (malanga, yuca, etc.), la lámina de escurrimiento total pasó de 562 mm, como promedio, en el periodo antes de la tala (81-88) a 1081 mm en el periodo posterior a la tala (86-89), duplicándose prácticamente este indicador, si se tiene en cuenta que en estos periodos específicamente el escurrimiento superficial pasó de 52 mm (9.2 %) a 324 mm (30 %) respectivamente del primero(ante de la tala), al segundo periodo(después de la tala), pero de igual forma el indicador erosión que en el periodo antes de la tala estaba en el orden 94.5 kg/ha, aumentó a 1306.3 kg/ha como promedio en el periodo posterior a la tala, o sea llegando a ser 11.4 veces mayor que antes de la acción, pudiéndose destacar que en el cuarto año de cultivo llegó a la cifra de 3266 kg/ha o sea que cada año fue ascendiendo la erosión (Fig. 9.1), demostrándose la necesidad de repoblar inmediatamente después de las talas totales y no aplicar cultivos anuales en estas condiciones.

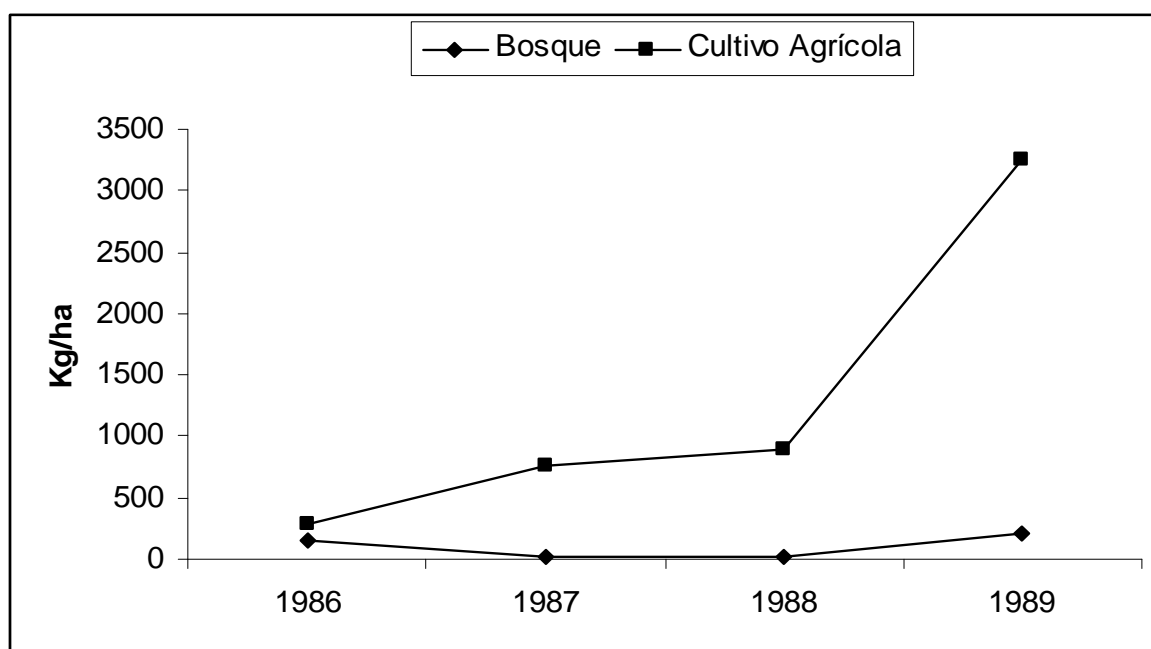


Figura 9.1. Erosión del suelo en parcela de balance hídrico.

Como era de esperar, todos los métodos de tala empleados incrementaron el escurrimiento sólido, pero fue en la subcuenca 3 donde se observaron los mayores niveles, superiores hasta en cuatro veces en comparación con la subcuenca testigo (Melchanov y Mora, 1990), lo que se debió a que en esta subcuenca, la remoción del suelo debido a las actividades de tala, acopio de los árboles y la posterior reforestación, fue más intensa que en las restantes. Además, la tala del bosque de galería, permitió que los materiales erodados llegaran fácilmente a la red fluvial lo que se tradujo en un incremento sustancial de la concentración de sólidos en suspensión en la corriente que drena la subcuenca mencionada. Este incremento pudo haber sido mucho mayor si esta subcuenca a pesar de ser sometida, respecto a la tala a un tipo de manejo inadecuado, de forma inmediata sus restos fueron acordonados a curva de nivel, para prepararlo para la reforestación con aradura animal a curva de nivel terraza individual y hoyos de plantación de acuerdo a la pendiente y estos últimos al tresbolillo.

Estos resultados demuestran que la tala del bosque de conífera sobre maduro y de baja densidad, en las Alturas de Pizarra, los cuales ocupan una superficie de aproximadamente de 190000 ha (Herrero *et al.*, 1983), es, desde el punto

de vista hidrológico y de protección de los suelos, factible, sin que por ello se comprometan irreversiblemente estas funciones ni se puedan esperar incrementos sustanciales en la lámina de escurrimiento. Pone de manifiesto, además, la gran importancia hidrológica de los bosques de ribera e impiden el arribo a los cauces de los productos de la erosión prolongando la vida útil de las presas.

Se coincide con Samek (1967), en que las talas rasas constituyen un sistema silvicultural para los pinares de Cuba que no se debe excluir, siempre y cuando se cumplan determinadas exigencias desde el punto de vista de la protección del suelo y las aguas, siendo condición indispensable en la zona de Alturas de Pizarra, entre otras, la conservación de los bosques de galería.

Los resultados demuestran que independientemente del método de la tala empleado, siempre se deben tomar las medidas de protección necesarias, las cuales deben intensificarse en grado proporcional al aumento de la pendiente. Es imprescindible igualmente, la delimitación de los rodales a talar, respetando los límites naturales de las cuencas y subcuencas.

Teniendo en cuenta que en la práctica ocurre la falta de información debido a la ausencia de papel de filtro, a la toma de muestra simultáneas o producto de otras causas que se presentan en investigaciones a largo plazo, es que a la hora de realizar el estudio estadístico se tomaron los datos de erosión en g/l/ha, siempre que coincidieran en fecha, en las cuencas pareadas, es decir, la 2 (control) con la 1 (donde se aplicó la tala selectiva), con la 3 (donde se aplicó la tala total) y con la 4 (donde se efectuó la tala total dejando bosque de galería).

Algunos resultados del análisis estadístico:

Estadísticos descriptivos

Variable dependiente: Erosión Subcuenca 1 (g/ha)

Subcuenca	Media	Desv. típ.	N
1	6259,1978	18207,419	192
3	10233,430	25940,553	142
4	10132,178	25087,375	133
dos con cuatro	4889,9801	14117,098	133
dos con uno	3754,0031	9847,6267	192
dos con tres	5305,3217	15646,616	142
Total	6559,9406	18702,893	934

Se aplicó la décima de significación para la comparación de la erosión media entre las cuencas pareadas tomando en consideración un nivel de significación del 5%. La comparación entre las cuencas 1 y 2 ($p=0.09461$) arrojó que no existen diferencias significativas entre las mismas. Este resultado era de esperar, puesto que en la primera cuenca se efectuó una tala selectiva donde solo se extrajo el 15 % de los árboles con el mínimo de remoción del suelo.

La erosión de la cuenca 3 respecto a la 2 s  dio significativamente diferente ($p=0.05$), siendo muy superior en la cuenca donde se aplicó la tala total. Este resultado se corresponde con lo esperado, ya que en la cuenca 3 se efectuó una tala total incluyendo el bosque de galería, lo que aceler  el proceso erosivo, principalmente en los primeros años, ya que dicha cuenca fue de inmediato sometida a una reforestación, con una preparación del sitio a curva de nivel y terrazas individuales al tresbolillo.

Entre la cuenca 4 y la 2 existen diferencias significativas (0,036), siendo superior en la cuenca donde se efectuó la tala total dejando el bosque de galería. En este caso también sucedió lo esperado, pero con menos efectos debido a que se efectuó la tala total de las coníferas, pero se respet  el bosque de galería, el cual hace función de faja forestal hidrorreguladora y antierosiva.

Los anteriores  n lisis, nos permite concluir que la hipótesis fundamental de dicho capítulo se cumple teniendo en cuenta que los manejos de explotación producen alteraciones de diversa importancia, pero cuando estos se realizan cuidadosamente, aplicando las técnicas silvícola, son admisibles en un aprovechamiento sostenible de los pinares.

9.3. Conclusiones y recomendaciones:

Conclusiones

- Cualquiera de las experiencias de tala conduce, a incrementos en los caudales de escorrentía que se producen en los meses inmediatos. El aterrazamiento en curvas de nivel y la confección de hoyos de plantación, combinado con terrazas individuales en el proceso de reforestación de las subcuencas produce un aumento de escurrimiento respecto a la fase de calibrado cuando no se conserva el bosque de

galería, y sin embargo ocasiona una disminución cuando éste se conserva.

- El mayor arrastre de sustancias y elementos químicos ocurrió en la subcuenca donde se aplica la tala rasa total y los compuestos que más se afectaron fueron carbonato, calcio, sodio y cloro. El escurrimiento iónico varió de forma similar a las pérdidas de suelo y disminuyó en la medida en que se restablece el bosque nuevamente.
- En la subcuenca 2 (control) la erosión hídrica fue del orden 140 kg/ha/año.
- En el periodo de calibrado (1979-1981), las 4 cuenca objeto de estudios ante de ser sometida a los manejos (talas), tuvieron un comportamiento parecido del orden de 140-221 kg/ha/año, permitiendo efectuar el resto de las investigaciones por el sistema de cuencas pareadas.
- La tala rasa total del bosque de pinos en los primeros años provoca una marcada aceleración de los procesos erosivos del suelo, superior al resto de las talas empleadas.
- En la medida que el bosque joven se desarrolla, se observa una tendencia al restablecimiento de los niveles de erosión normal.
- La tala del bosque de coníferas antropizado y de baja densidad que se desarrolla en las alturas de Pizarra y la reforestación inmediata es, desde el punto de vista de la protección de los recursos hídricos y de los suelos, factible.
- A pesar de que los manejos de explotación forestal, producen alteraciones de diversa importancia, si estos son realizados cuidadosamente aplicando las técnicas silvícola, son admisibles en un aprovechamiento sostenible de los pinares.

Recomendaciones:

- Para el aprovechamiento del bosque de coníferas sobre maduros y de baja densidad que se desarrollan sobre las Alturas de Pizarra, prohibir la tala rasa total debiéndose emplear la tala selectiva individual o la tala rasa dejando el bosque de galería.

- En el caso de talas rasas dejando el bosque de Galería la zona afectada debe ser reforestada de inmediato.
- Continuar profundizando sobre la hidrológica forestal con vistas a conocer el manejo más adecuado del bosque para nuestras condiciones tropicales.

CAPITULO 10.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:

CONCLUSIONES

- 1- Respecto a la hipótesis general sobre los efectos de los sistemas de explotación silvícola, se acepta que la afectación que producen es moderada.
- 2- En cuanto al grado de afectación es la tala rasa el procedimiento más impactante seguido de la tala rasa conservando el bosque de galería y de la tala selectiva.
- 3- Se observa una tendencia al aumento en la temperatura media del aire y en el caso de la temperatura del arroyo se aprecian tendencias al incremento en algunos meses del año, algunas de las cuales, podrían no ser debidas a las variaciones de caudal.
- 4- Al igual que ocurre en el resto del país, cuando se analizan por separado las tendencias de las temperatura en épocas seca y húmeda, no se aprecia un aumento en la primera de ellas pero si en la que recoge el mayor porcentaje de la precipitación.
- 5- No se aprecia en la Amistad la tendencia al incremento de las temperaturas mínimas medias observada para el conjunto de Cuba, y sin embargo si se ha encontrado en las temperaturas máximas absolutas del período lluvioso
- 6- En el caso del volumen de precipitación anual no se detectan tendencias ni en el país ni en la estación. Sin embargo, si se analizan los periodos por separado, en la estación con más volumen de lluvia, para el total de Cuba se ha encontrado una disminución significativa, mientras que en Amistad se observa un aumento. En el caso de la época menos lluviosa se ve un incremento significativo en el conjunto del país y no se aprecia una pauta de variación significativa en la Amistad.
- 7- Destaca en la estación Amistad, un incremento de la humedad relativa, muy significativo, tanto para los datos anuales como para los de seca y húmeda, lo que contrasta con la opinión generalizada entre los expertos que predecían una mayor constancia de esa variable.
- 8- A esta tendencia creciente le corresponde, en el caso concreto de la Amistad una decreciente de los valores de evaporación, que también

resulta muy significativa en los datos de todo el período anual o por semestres.

- 9- En el análisis de los flujos hidrológicos se encuentran los siguientes valores: Traslación (81.19 % en coníferas y 73.44 en latifolias), Escurrimiento cortical (1.81 % en coníferas y 1.67 % en latifolias) e Interceptación (17% en coníferas y 24.89 % en latifolias).
- 10-Las regresiones lineales entre la precipitación a cielo abierto y el volumen de agua colectado por cada pluviómetro, tanto para coníferas como latifolias, son muy significativas y los valores de las pendientes también difieren significativamente entre una especie y otra lo que demuestra la mayor traslación en el caso de las coníferas.
- 11-Para el conjunto total de datos, los resultados estadísticos demuestran la existencia de diferencia altamente significativa para la traslación y la interceptación entre coníferas y latifolias, no siendo igual para el escurrimiento. En el caso particular del escurrimiento para *P. tropicalis* y *P. caribaea* se confirmó la hipótesis de que en Pt es mayor el escurrimiento y la diferencia es altamente significativa lo que permite asegurar que este es uno de los factores por lo cual esta especie ofrece gran resistencia a las condiciones de bajo nivel de humedad del suelo.
- 12.- En los bosques de coníferas el coeficiente de evaporación total tiende a disminuir cuando las precipitaciones tienden a aumentar en su total anual y su distribución en el año es más uniforme.
- 13.- Según los análisis estadísticos, en las subcuencas de la Estación Amistad hay una alta significación entre la precipitación y el escurrimiento anual y en el período húmedo (significativos $p < 0,000$ y a $p < 0,001$), pero en el período seco los cuales son menos significativos.
- 14-Según análisis estadístico en la subcuencas de la Estación Amistad las relaciones entre precipitación y la evapotranspiración anual y el período húmedo hay significación menor que con el escurrimiento pero los mayores valores del coeficiente de determinación se encuentran, en tres de las cuencas en el período seco.
- 15-Teniendo en cuenta el modelo general de la partición de la lluvia entre escurrimiento y evapotranspiración de Piñol en el caso de la Estación Amistad tiene una tendencia en los escenarios previsto de cambio

- climático, hacia un clima más árido aumentando la evapotranspiración y disminuyendo el escurrimiento, con énfasis en el período seco.
- 16-En la estación Amistad la deposición global tiene un carácter ácido, estando el 78,2% del número de lluvias por debajo de 5,6 de pH.
 - 17-El 74,8% del volumen de precipitación, se corresponden con los pH menores de 5,6 en la Estación Amistad.
 - 18-Se comprueba que existe una relación significativa entre los volúmenes de lluvia recolectada y la concentración de hidrogeniones, en el sentido de que las precipitaciones más caudalosas tienden a tener menores valores de pH.
 - 19-La cuenca testigo tiene un agua de escurrimiento muy poca mineralizada con solo 72,25 mg L⁻¹ como promedio, en relación a las 18 muestras fluviales de la provincia de Pinar del Río con (214,66 mg L⁻¹).
 - 20-Como era de esperar hay una tendencia a la acidificación del arroyo de la subcuenca 2 y sus semejantes a través de la diferencia de la estima de la deposición global y una salida de acidez obteniéndose como resultado un ingreso neto del orden de 0,102 keq ha⁻¹ año de iones hidrógeno.
 - 21-Las regresiones lineales con una disminución significativa de los valores del pH y los aumentos significativos de las concentraciones de calcio, magnesio y sulfato, ponen de manifiesto la tendencia a la acidificación del ecosistema pinar.
 - 22-Cualquiera de las experiencias de tala conduce, a incrementos en los caudales de esorrentía que se producen en los meses inmediatos.
 - 23-El mayor arrastre de sustancias y elementos químicos ocurrió en la subcuenca donde se aplica la tala rasa total y los compuestos que más se afectaron fueron carbonato, calcio, sodio y cloro. El escurrimiento iónico varió de forma similar a las pérdidas de suelo y disminuyó en la medida en que se restablece el bosque nuevamente.
 - 24-La tala rasa total del bosque de pinos en los primeros años provoca una marcada aceleración de los procesos erosivos del suelo, superior al resto de las talas empleadas.
 - 25- A pesar de que los manejos de explotación forestal, producen alteraciones de diversa importancia, si estos son realizados

cuidadosamente aplicando las técnicas silvícola, son admisibles en un aprovechamiento sostenible de los pinares.

RECOMENDACIONES

- 1- Para el aprovechamiento del bosque de coníferas sobre maduros y de baja densidad que se desarrollan sobre las Alturas de Pizarra, prohibir la tala rasa total debiéndose emplear la tala selectiva individual o la tala rasa dejando el bosque de galería.
- 2- En el caso de talas rasas dejando el bosque de Galería la zona afectada debe ser reforestada de inmediato.

CAPÍTULO 11.- BIBLIOGRAFIA

Abadanes JC et al. (2007) El cambio climático en España. Estado de situación. Documento resumen.

Aboal, J, R.; Jimenez, M. Soledad; Morales, D y Hernandez, J.M. (1999) Rainfall interception in laurel forest in the Canary Islands. Agricultural and Forest Meteorology 97 (2): 73-86.

Academia de Ciencias de Cuba (1990): Atlas Nacional de Cuba. La Habana, Cuba. Instituto de Geografía e instituto de Geodesia y Cartografía.

Adams, K.N, Fowler, A.M. (2006) Improving empirical relationships for predicting the effect of vegetation change on annual water yield. Journal of Hydrology 321:90-115.

Ahearn, D.; Sheibley, R.W.; Dahlgren, R.A. y Keller, K.E. (2004) Temporal dynamics of stream water chemistry in the last free-flowing river draining the western Sierra Nevada, California. Journal of Hydrology 295:47-63.

Alebic JA (1995) Trends in sulphur dioxide concentrations and sulphur deposition in the urban atmosphere of Rijaka (Croatia) 1984-1993. Water, Air and Soil Pollution 85:2199-2204.

Allen, R.; Smith, M. y Perrier, A. (1994) An update for the definition and calculation of reference evapotranspiration. International Comission for Irrigation and Drainage (ICID) Bulletin 43:34-92.

Anderson, G. (1970): La influencia de la vegetación boscosa sobre la nieve y el deshielo y sus regulaciones. Traducido del ruso por el programa de Decenio Hidrológico Internacional. Simposio internacional de influencia del bosque en el medio ambiente. Moscú P 21-37.

Aussenac, J., (1970) Action du couvert forestier sur la distribution au sol des précipitations. Ann. Sci. Forest., 27 (4): 383-399.

Aussenac, J. (1981) L` interception des précipitations par lês peuplements forestiers. La Houille Blanche, 7/8: 533- 536.

- Avila, A.** (1988) Balanç d'aigua i nutrients en una conca d'alzinar del Montseny. Tesis doctoral, Universitat Autònoma de Barcelona.
- Avila, A. y Roda, F.** (1984) Variaciones del quimismo del arroyo durante las crecidas en una cuenca de encinar montano. Cuadernos de Investigación Geográfica 11: 21-31.
- Avila, A.; Piñol, J.; Roda F.; y Neal, C.** (1992) Storm solute behaviour in a montane Mediterranean forested catchment. Journal of Hydrology 140:143-161.
- Avila A** (1996) Time trends in the precipitation chemistry at a mountain site in north-eastern Spain for the period 1983-1994. Atmospheric Environment 30:1363-1373.
- Ávila A. Bellot J, Piñol J** (1999) Element budgets in catchments en Rodà F. Retana J. Gracia CA. Bellot J (eds) Ecology of Mediterranean evergreen oak forest pp 283-296. Springer.
- Beamish RJ, Lockhart WL, Van Loon CD, Harvey HH** (1975) Long-term acidification of a lake and resulting effects on fishes. Ambio 4:98-102.
- Barth, T.F.W.** (1961) Abundance of the elements, areal averages and geochemical cycles Geochimica Cosmochimica Acta 23:1-8.
- Bates, C.G. y Henry A.J.** (1928) Forest and streamflow experiment at Wagon Wheel Gap. Colorado. U.S. Monthly weather review suppl. Nº 36.
- Batista, L.** (1982) Escurrimiento medio anual y su variabilidad. Voluntad hidráulica 58:30-32.
- Beamish RJ, Lockhart WL, Van Loon CD, Harvey HH** (1975) Long-term acidification of a lake and resulting effects on fishes. Ambio 4:98-102.
- Belillas, M.C.** (1989) Balance de nutrientes y efecto del fuego en cuencas de landa. La Calma. Montseny. Tesis doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona.
- Bellot, J.** (1989) Análisis de los flujos de deposición global, trascolación, escorrentía cortical y deposición seca en el encinar mediterráneo de l'Avic (Sierra de Prades, Tarragona). Tesis doctoral, Universidad de Alicante
- Bellot, J. y Escarre, A.** (1998) Stemflow and throughfall determination in a resprouted Mediterranean holm-oak forest. Annales des Sciences Forestieres 55 (7) 847-865.
- Berner, E.K. y Berner, R.A.** (1987) The global water cycle. Prentice Hall.

- Berge, E.** (1988) Time-trends of sulphate and nitrate in precipitation in Norway (1972-1982). *Atmospheric Environment* 22:333-338.
- Belmonte, S. F. y Romero, D. A.** (1999) Balance hídrico y distribución espacial de la trascolación bajo cobertura de pino: influencia de la dirección del viento y la pendiente de la ladera. *Lurralde inves. esp.* 22: 339-350.
- Belmonte, S. F.; Romero, D. A.; López, B. F. y Hernández, L. E.** (1999) Óptimo de cobertura vegetal en relación a las pérdidas de suelo por erosión hídrica y las pérdidas de lluvia por interceptación. *Universidad de Murcia. Papeles de Geografía* 30:5-15.
- Bermúdez, P.** (1961) Las formaciones geológicas de Cuba. La Habana
- Bormann, F. H.; Likens, G. E.** (1967) Nutrient cycling. *Science* 155:424-429.
- Bormann, F.H.; Likens, G. E** (1979) Pattern and process in a forested ecosystem. Springer-Verlag.
- Bosch, J. L. & Hewlett, J. D.** (1982): A review of catchments experiment to determine the effects of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 115:297-313.
- Burns DA, Riva-Murray K, Bode RW, Passy S** (2008) Changes in stream chemistry and biology in response to reduced levels of acid deposition during 1987-2003 in the Neversink River Basin, Catskill Mountains. *Ecological Indicators* 8:191-203.
- Buvaneswaran, C.; George, M. y Mohan, S.** (2003) Distribution of rainfall under Teak plantation. *Indian Forester* 129 (5): 571-577.
- Brand, D.G.; Kehoe, P. and Connors, M.** (1986) Coniferous afforestation leads topsoil acidification in central Ontario. *Canadian Journal of Forest research* 16:1289-1391.
- Brasseur, G.P.; Orlando, J.J. y Tyndall, G.S.** (1999) Atmospheric chemistry and global change. Oxford University Press.
- Blackie, J, R.** (1979) The water balance of the Kericho catchments. *East African Agricultural and Forestry Journal* 43:55-84.
- Bridgman HA** (1989). Acid rain studies in Australia and New Zealand. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 18: 137 – 146.
- Brien, L. y Hopmans, P.** (2007) Paired catchments observations on the water yield of mature eucalypt and immature radiata pine plantations in Victoria, Australia. *Journal of Hydrology* 336:416-429.

- Bruijnzeel, L. A.** (1989): Los bosques tropicales y los servicios ambientales. Efecto de la reforestación.
- Bruijnzeel, L.A.** (1990): Hydrology of moist tropical forest and effects of conversion. A state of knowledge review, Faculty of Earth Science, Free University, Netherlands.
- Bruijnzeel, L.A** (1997) Pine plantations hydrology in the tropics en Nambiar EK. Brown AG (eds) Management of soil. Nutrients and water in tropical plantations forest. CSIRO. Australia.
- Bruijnzeel, L.A.** (2004): Revisión bibliográfica sobre el efecto que ejerce la presencia o ausencia de una buena cobertura boscosa o sobre el clima (precipitación) y sobre el aporte hídrico tanto estacional como total. P 240.245.
- Bruijnzeel, L.A.** (2008). Hidrología de las plantaciones en los trópicos. Traducido por grupos de hidrología (R-1010) Colombia.
- Brook, K.N.** (1991): Hydrology and the management of watersheds. Iowa State University Press.
- Buldgen, P., Cajot, O., Monjoie, A. & Romacle, J.** (1984): Biogéochimie des bassins versants de l'est de la Belgique. Physio. Geo. 9: 47-59.
- Cairo CP y. Fundora H O** (1994): Edafología. Editorial Pueblo y Educación. La Habana, Cuba, 250 pp
- Canell, M.** (1999) Environmental impacts of forest monocultures: Water use, acidification, wildlife conservation, and carbon storage. New Forests 17: 239-262.
- Calder, I. R.** (1998): Water- resource and land. SWIM Paper 3 Colombo II M I.
- Calzadilla, E.** (1977): Estudio de los suelos del área experimental de la estación hidrológica forestal Amistad. C. de la Habana. Centro de investigación forestal p 11.
- Calzadilla, E.; Forcades, E. & Alvarez, L.** (1988): Estudio de las condiciones edafológicas, de la EFI La Palma. Propositiones sobre el uso y manejo de los suelos. Mecanografiado. Ciudad de la Habana. Instituto de investigaciones forestales. P 58.
- Carratalá A.** (1993). Caracterización química de la precipitación en la Comunidad Valenciana. Distribución espacial y temporal. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante.

Carratalá A., Bellot, J., Gómez A., y Millan, M. (1996) African dust influence on rainwater on the eastern coast of Spain, in Guerzoni S. and Chester R. (eds.). The impact of desert dust across the Mediterranean, 323-332. Kluwer Academic Publishers.

CATIE (2006) Manual Técnico número 63.

Centella A, Naranjo L, Paz L, Cardenas P, Lapinel B, Ballester M, Perez R, Alfonso A, Gonzalez C, Limia M, Sosa M (1997) Variaciones y cambio del clima en Cuba. Informe Técnico. Centro Nacional del Clima. Instituto de Meteorología. La Habana.

Centella A, Gutiérrez T, Limia M y Rivero R (1999) Climate change scenarios for impact assessment in Cuba, Climate Research 12:223-230.

Centella A, Llanes J, Paz L, López C y Limia M (eds) (2001) Primer comunicación Nacional a la Convencion Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Instituto de Meteorología, La Habana.

CITMA (2005) Estrategia Ambiental

Cogbill CV (1976) The history and carácter of acid precipitation in Eastern North America. Water, Air and Soil Pollution 6:407-413.

Cogbill CV, Likens GE (1974) Acid precipitation in the northeastern United States. Water Resources Research 10:1133-1137.

Coro, J.J. (2001) Nuevas perspectivas para el uso del agua y la gestión de los recursos vegetales en la cuenca del río Cuyaguateje. Tesis doctoral. Universidad de Alicante.

Cosby, B.J.; Wright, R.F.; Hornberger, G.M. y Galloway, J.N. (1985) Modelling the effects of acid deposition: estimation of long-term water quality responses in a small forested catchment. Water Resources Research 21:1591-1601.

Clemente, A. (1983): Componentes específicos y estacional en la variación de contenidos en elementos químicos de las especies y formas biológicas del encinar mediterráneo. Tesis de Licenciatura. Universidad de Alicante.

Davitaya, F. y Trusov, I. (1965): Los recursos climáticos de Cuba. La Habana. Academia de Ciencia de Cuba. Instituto nacional de recursos hidráulicos. P68.

Das, R; Das, SN; Misra, VN. (2005). Chemical composition of rainwater and dustfall at Bhubaneswar in the east coast of India. Atmospheric Environment. 39(32): 5908-5916.

De Villiers, S. (2005) The hydrochemistry of rivers in KwaZulu-Natal. Water SA (Pretoria) 31:193-197.

De Pedraza J (1996): Geomorfología, principios, métodos y aplicaciones. Editorial Rueda, 413 pp.

De Pedraza J (1996): Geomorfología, principios, métodos y aplicaciones. Editorial Rueda, 413 pp.

Del Val J. (1987): Factores que controlan los procesos de erosión sedimentación. En Riesgos Geológicos. Serie Geológica Ambiental, Instituto Geológico y Minero de España, pp.20-33.

Dignon J, Hameed S (1989) Global emissions of nitrogen and sulphur oxides from 1860 to 1980. Journal, Air Pollution Control Association 39:180-186.

Dinámica Forestal (2005): Servicio Estatal Forestal. Pinar del Río.

Dinamica Forestal (2008): Direccion Nacional Forestal.

Dupraz, C.H. (1984): Bilan des transferts d'elements minéraux dans trois bassins versants comparatifs à végétations contrastées (Mont-Lozère, France). Thèse doctoral, U. d'Orléans.

Driscoll CT, Likens GE, Church MR (1998) Recovery of surface waters in the northeastern U.S. from decreases in atmospheric deposition of sulphur. Water, Air and Soil Pollution 105:319-329.

Dye, P. y Versfeld, D. (2007) Managing the hydrological impacts of South African plantation forests: An overview. Forest Ecology and Management 251:121-128.

Edmunds WM, Kinniburgh DG (1986) The susceptibility of UK groundwaters to acidic deposition. Journal of the Geological Society of London 143:707-727.

Escarré A, Lledo, M.J., Harvas, J., Pujolte, E. y Garrido.P (1982) Balance de nutrientes en pequeñas cuencas de encinar. Selección de zona de estudio, instalación de instrumentos para la adquisición de recogida de datos Mediterranea Ser. Biol. 6:141-165.

Escarré, A.; Lledó, M.J.; Sánchez, J.R.; Clemente, J.; Bellot, J.; Esclapés, A. y Rovira, A. (1984) Compartimentos y flujos biogeoquímicos en un encinar, distinto predominio de factores físicos y biológicos en su control. Revista del Jardín Botánico Nacional, La Habana 5:65-80.

Escarré, A.; Lledó, M.J.; Bellot, J.; Martín, J.; Esclapés, A.; Seva, E.; Rovira A. y Sánchez, J.R. (1986) Balance hídrico, meteorización y erosión en una pequeña cuenca de encinar mediterráneo. Proyecto LUCDEME. Monografías de ICONA 47:57-115.

Evans CD, Cullen JM, Alewell C, Kopáček J, Marchetto A, Moldan F, Prechtel A, Rogora M, Vesely J, Wrigth R. (2001) Recovery from acidification in European surface waters. *Hydrology & Earth System Sciences* 5:283-297.

FAO (2000): Relación tierra-agua en cuencas hidrográficas rurales. Síntesis del Taller Electrónico, Roma, 28p.

Febles JM. (1988): La erosión de los suelos en las regiones cársicas de la provincia de La Habana [inédito], tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Agrícolas, Facultad de Agronomía, Instituto Superior de Ciencias Agropecuarias de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez

Febles JM y Durán JL (2006): Manual de Erosión y Conservación de Suelos. Editorial Félix Varela, 3ra. Edición 220 pp.

Fernandez, M.J.; Fernandez, V. y García, E. (1997) Atmospheric deposition and ionic concentration in soils under pine and deciduous forests in the river Sor catchment (Galicia, NW Spain). *Science of the Total Environment*. 204:125-134.

Fernández, J.M. (1999) Características del comportamiento temporal y espacial de la evaporación en el occidente de la isla de Cuba. Tesis doctoral. Universidad de La Habana.

Fischer, D.T.; Smith, S.V. y Churchill, R.R. (1996) Simulation of a century of runoff across the Tomales watershed. Marin County. California. *Journal of Hydrology* 186:253-273.

Foell, W.; Green, C.; Amann, M.; Bhattacharya, S.; Carmichael, G.; Chacwick, M.; Cinderby, S.; Haughland, T.; Heitlingh. J. P.; Hordijk, L.; Kuylensstierna, J.; Shah J, Shrestha R, Streets, D. y Zhao, D. (1995) Energy use, emission, and air pollution reduction strategies in Asia. *Water Air and Soil Pollution* 85:2277-2282.

Fonseca CM (1989) Análisis de la tendencia de la temperatura media del aire. Tesis de Diploma. Universidad de la Habana.

FORCUBA. (1998): Dirección Nacional Forestal MINAGRI

Forti, M.C.; Boulet, R.; Melfi, A.J. y Neal, C. (2000) Hydrogeochemistry of a small catchment in Northeastern Amazonia: A comparison between natural with deforested parts of the catchment (Serra do Navio, Amapa State, Brazil) *Water Air and Soil Pollution* 118:263-279.

Fukushima, K.; Nakajima, R.; Sato, A. y Sakurai, T. (2000) Relationships between stream water chemistry and catchment geology in a mountainous region in Nagano Prefecture, Japan II: Mid to southern part along the Median Tectonic Line. *Limnology* 1:117-127.

Géigel, B.; Molina, A.R.; Baños, N. y Lovaina, B. (1982): Estudio comparativo sobre perdidas de suelo y agua en los suelos montañosos de Guisa, bajo cuatro sistemas distintos de preparación del sitio de plantación. Primera jornada científica-técnica de la Estación experimental de Guisa.

Gibbs, R.J. (1970) Mechanism controlling world water chemistry. *Science* 170:1088-1090.

Godoy, R; Oyarzun, C. y Bahamondes, Jacqueline (1999) Hydrochemical fluxes in a *Nothofagus pumilio* forest in Puyehue National Park, southern Chile. *Revista-Chilena-de-Historia-Natural*. Dec., 1999; 72 (4): 579-594.

Gogolev B (inédito a) Informe fechado en 1981. Recursos de las aguas superficiales de la República de Cuba (Provincia Pinar del Río) II parte. Ministerio de la Construcción Empresa de Hidroeconomía, Pinar del Río.

González-Abreu, A, Geigel, F. B., Quintana, T., Perera, A. (1985): Algunas características de la materia orgánica de los suelos forestales de la cuenca del río San Diego. *Rev. Forestal Baracoa*, 15(1): 7-18.

González, C. et al., 1987. Atlas climático de Cuba. Editado por el ICGC. 207 p.

Gobin A, Govers G, Jones R, Kirkby M y Kosmas C (2003): Assessment and reporting on soil erosion. Background and workshop report. European Environment Agency. Technical Report 94. [citado 10 febrero 2005] Disponible en Internet: [URL:<http://reports.eea.eu.int/technical_report_2003_94/en](http://reports.eea.eu.int/technical_report_2003_94/en)

Graves J, Reavey D (1996) Global environmental change. Plants, animals and communities. Longman.

- Gu-Rey, R. & Li-Yitin** (2002): River temperatura sensitivity to hydraulic and meteorological parameter. *Journal of Environmental management* 66(1): 43-56.
- Hallbäck, L. y Tamm, C.O.** (1986) Changes in soil acidity from 1927 to 1982-84 in forest areas of south-west Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 1:219-232
- Herrero, J. A. y col:** (1975): Influencia de la tala de bosques en la erosión y el escurrimiento superficial. *Revista forestal Baracoa*, 5:3-4.
- Herrero, J. A. y Melchanov, V.A.** (1981): El escurrimiento líquido y sólido en áreas forestales y agrícolas de la provincia de Pinar del Río. Datos de parcelas experimentales de escurrimiento. *Revista forestal Baracoa*.1:5-13.
- Herrero, J.; Molina, R. y Melchanov, V.A.** (1983) Los bosques en Cuba. Su función y significado antierosivo. *Revista Forestal Baracoa* 13 (1): 83-90.
- Herrero, J.A.** (2003): Fajas forestales Hidrorreguladoras. Dirección Nacional Forestal. MINAG. La Habana.
- Hegerl GC, Zwiers FW, Braconnot P et al.** (2007) Understanding and attributing climate change en Salomon S, Qin D, Manning M *et al.* Climate change 2007: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental on Climate Change pp:663-745, Cambridge University Press.
- Helvey JD** (1980) Effect of a north-central Washington wild-fire on runoff and sediment production. *Water Resources Bulletin* 16:625-634
- Helvey, J. D. y Patric, J. H.** (1965) Canopy and litter interception of rainfall by hardwoods in the Eastern United States. *Water Resources Research* 1: 193-206.
- Hill, A.R.** (1993) Base cation chemistry of storm runoff in a forested headwater wetland. *Water Resources Research* 29:2663-2673.
- Hindar, A.** (2005) Whole-catchment application of dolomite to mitigate episodic acidification of streams induced by sea-salt deposition. *Science of the Total Environment* 343:35-49.
- Houmand, M.F. y Andersen, H.V.** (1995) Nine years of measurements of atmospheric nitrogen and sulphur deposition to Danish forest. *Water, Air and Soil Pollution* 85: 2205-2210.

Hopmans, P. y Bren, L. (2007) Long-term changes in water quality and solute exports in headwater streams of intensively managed radiata pine and natural eucalypt

Holloway, J. y Dahlgren, R. (2001) Seasonal and event-scale variations in solute chemistry for four Sierra Nevada catchments. *Journal of Hydrology* 250:106-121.

Hutchinson, T.C. y Havas, M. (eds) (1980) Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems forest catchments in south-eastern Australia. *Forest Ecology and Management* 253:244-261.

Huber, A. y Iroume, A. (2001) Variability of annual rainfall partitioning for different sites and forest covers in Chile. *Journal of Hydrology Amsterdam*. 248 (1-4): 78-92.

ICGC (1978): Instituto de Cartografía y Geodesia de Cuba. Academia de Ciencia. La Habana.

Ibarra, C. M. et al. (1978) Atlas de Cuba. Instituto cubano de geodesia y Cartografía. 143 p.

Ingebo PA, Hibbert AR (1974) Runoff and erosion after brush suppression on the natural drainage watersheds in central Arizona. *US Dep.Agric. For. Res. Note R.N:-275*.

INSMET s/f. Elementos de Meteorología y Climatología. Tabloide curso Universidad para todos. Editorial Academia

Iroume, A.; Huber, A. y Schulz, K. (2005) Summer flows in experimental catchments with different forest covers, Chile. *Journal of Hydrology* 300:300-313.

Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) (2002): Los recursos hidraulicos en cifras. *Rev Voluntad Hidráulica*. Ed. Especial p 15-19. Instituto de Suelos (1980): Clasificación genética de los suelos de Cuba. *Acad. Cien. Cuba*, La Habana, 29 p.

Instituto de Suelos (1980): Clasificación genética de los suelos de Cuba. *Acad. Cien. Cuba*, La Habana, 29 p.

IPCC (2007) Cambio climatico 2007: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del grupo intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Equipo de

redacción principal: Pachauri RK y Reisinger A (directores de la publicación). IPCC, Ginebra.

Jenkins, A. (1989) Storm period hydrochemical response in an unforested Scottish catchment Hydrological Science Journal 34:393-404.

Jiulet, D. D. (1970). Metodología para la determinación de la escorrentía total en cuencas experimentales. Traducido del ruso por el programa D.A. Simposio Internacional. La influencia del bosque en el medio ambiente. Moscú. Pag. 59-79.

Johnson AH (1979) evidence of acidification of headwater streams in the New Jersey pineland. Science 206:834-836.

Johnson-Maynard, J.L.; Graham, R.C.; Shouse, P.J. y Quideau, S.A. (2005) Base cation and silicon biogeochemistry under pine and scrub oak monocultures: implications for weathering rates. Geoderma 2005 126:353-365.

Jonas, P.R.; Charlson, R.J. y Rhode, H. (1995) Aerosols in Houghton JT, Meira Filho LG, Bruce, J.; Lee, H.; Callender, B.A.; Haites, E.; Harris, N. y Maskell, K. (eds.) Climate change 1994 pp 127-162. Cambridge University Press

Jones JAA (1997) Global hydrology. Pearson, Prentice Hall.

Jones PD (2009) Global temperature change over the instrumental period in the context of the last 1000 years, en Fernandez G *et al.* (eds) Predicciones de cambio climático y vegetación. 1er Seminario WCRP-DIVERSITAS pp 9-39. Universitat de Valencia.

Keeling CD, Bacastow RB, Carter AF, Piper SC, Whorf TP, Heimann M, Mook WG, Rouloffzen H (1989) A three-dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds: 1. Analysis of observational data, En Peterson DH (ed.) Aspects of climate variability in the Pacific and the western Americas, Geophysical Monographs 55, AGU, pp 165-236.

Kerenski, S.D. (1975): Interceptación de la lluvia por el bosque alto de baja calidad en la sierra del Rosario. Serie forestal. (22). P 3-12.

Kirchner, J.W. y Lydersen, E. (1995) Base cation depletion and potential long-term acidification of Norwegian catchments. Environmental Science and Technology 29: 1953-1960.

Kimmins, J. P. (1973) Some statical aspects sampling throughfall precipitation in nutrient cycling studies in British Columbia coastal Forest. *Ecology*, 54 (5): 1008-1019.

Kita, I., Sato, T., Kase, Y., Mitropoulos, P. (2004). Neutral rains at Athens, Greece: a natural safeguard against acidification of rains. *Science of the Total Environment*. 327(1-3): 285-294.

Kirkby MJ y. Morgan RP (1984): Erosión de suelos. Editorial Limusa, México, 375 pp

Kitzedzh, D. (1951): Influencia del bosque sobre el clima, suelo y el régimen de aguas. P 456.

Komatsu, H.; Kume, T. y Otsuki, K. (2008) The effect of converting a native broad-leaved forest to a coniferous plantation forest on annual water yield: A paired-catchment study in northern Japan. *Forest Ecology and Management*. 255:880-886.

Kulshrestha, UC., Kulshrestha, MJ., Sekar, R., Vairamani, M., Sarkar, AK., Parashar, DC. (2001). Investigation of alkaline nature of rain water in India. *Water Air and Soil Pollution*. 2001; 131(1-4 Part 3): 1685-1690

Larssen, T., Carmichael, GR. (2000). Acid rain and acidification in China: The importance of base cation deposition. *Environmental Pollution*. 110(1): 89-102

Larssen, T. y Holme, J. (2006) Afforestation, seasalt episodes and acidification: A paired catchment study in western Norway. *Environmental Pollution*. 2006; 139:440-450.

Lapinel, B., R.E. Rivero, y V. Cutie,(1993): Las sequias en Cuba en el periodo 1931-1900 Instituto de Meteorología Cuba, 100 pp.

Laws, E.A. (1993) Aquatic pollution. Ed. John Wiley & Sons.

Lane, P.N.J. y Mackay, S.M. (2001) Streamflow response of mixed-species eucalypt forests to patch cutting and thinning treatments. *Forest Ecology and Management* 143(1-3): 131-142

Lee, R. (1980) Forest Hydrology. Columbia University

Ledger, D.C. (1975) The water balance of an exceptionally wet catchment area in West Africa. *Journal of Hydrology* 24:207-214.

- Leopoldo, P.R. Franken W. Matsui E. Salati E** (1982) Estimava da evapotranspiração de floresta Amazonica de terra firme. *Acta Amazonica* 12:23-28.
- Lesch, W. y Scott, D.F.** (1997) The response in water yield to the thinning of *Pinus radiata*, *Pinus patula* and *Eucalyptus grandis* plantations. *Forest Ecology and Management* 99:295-307.
- Lewis WM, Weibezahn FH** (1981). Acid rain and major seasonal variation of hydrogen ion loading in a tropical watershed. *Acta Científica Venezolana* 32: 236 – 238.
- Lewis, D.; Singer, M.J.; Dahlgren, R.A. y Tate, K.W.** (2001) Hydrology in a California oak woodland watershed: a 17-year study. *Journal of Hydrology* 240:106-117.
- Lilienfein, J.; Wilcke, W.; Ayarza, M.A.; Vilela, L.; Do, C.L.S. y Zech, W.** (2000) Soil acidification in *Pinus caribaea* forests on Brazilian savanna Oxisols. *Forest Ecology and Management*. 128:145-157, Bormann
- Likens, G.E., F.H.; Johnson, N.M.; Fisher, D.W. & Pierce, R.S.** (1970) The effect of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in the Hubbard Brook watershed-ecosystem. *Ecological Monographs* 40:23-47.
- Likens GE, Bormann FH, Pierce RS, Eaton JS, Johnson NM** (1977): Biogeochemistry of a forested ecosystem. Springer-Verlag.
- Likens, G.E. y Driscoll, C.T.; Buso, D.C.; Mitchell, M.J.; Lovett, G.M.; Bailey, S.W.; Siccama, T.G.; Reiners, W.A. y Alewell, C.** (2002) The biogeochemistry of sulfur at Hubbard Brook. *Biogeochemistry* 60:235-316.
- Lindberg, S.E. y Garten, C.T.** (1988) Sources of sulphur in forest canopy. *Nature* 336:148-151.
- Liu, C.P. y Sheu, B.H.** (2007) Effects of the 921 earthquake on the water quality in the upper stream at the Guandaushi experimental forest. *Water Air and Soil Pollution* 179:19-27.
- Livingstone, D.A.** (1963) Chemical composition of rivers and lakes. US Geological Survey, Professional paper 440G.

Likens, G.E., Bormann, F.H., Johnson, N.M. & Pierce R.S. (1967): The calcium, magnesium, potassium and sodium budgets for a small forested ecosystem. *Ecology* 48.

Likens, G.E., Bormann F.H.; Pierce, R.S.; Eaton, J.S. y Johnson, N.M (1977) *Biogeochemistry of a forested ecosystem*. Springer-Verlag.

Likens, G.E. y Bormann FH (1995) *Biogeochemistry of a forested ecosystem*. Springer-Verlag.

Likens GE, Driscoll CT, Buso DC (1996) Long-term effects of acid rain: response and recovery of a forest ecosystem. *Science* 272:244-246.

López-Cadenas, F., Blanco, M. (1968): Aspectos cualitativos y cuantitativos de la erosión hídrica y del transporte y depósito de materiales, Inst. Forestal de Investigación y Experiencias, Madrid, España, 188 p.

López, F. (1977): Influencia de la vegetación sobre los elementos fundamentales del ciclo

López, C. (2006) *Introducción a la gestión de la calidad del aire*. Instituto Nacional de meteorología. La Habana.

Lossaint, P. y Rapp, M. (1971) Repartition de la matière organique productivité et cycle des éléments minéraux dans les écosystèmes de climat méditerranéen. In: P. Duvigneaud (ed.), *Productivité des écosystèmes forestiers*. Actes Coll. Bruxelles, UNESCO

Lynch J, Bowersox VC, Grimm JW (2000) Acid rain reduced in eastern United States. *Environmental Science and Technology* 34:940-949.

Lledó, M.J. y Escarré, A. (1985) Datos preliminares de la exportación de materia disuelta y particulada en una cuenca de encinar. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 11: 55-63.

Lledó, M.J. (1990) *Compartimentos y flujos biogeoquímicos en una cuenca de encinar del Monte Poblet*. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante.

Maia, A.F.S.; Fisco, G. y Fernández VI (1999) Microclimate and hydrology modifications due to the deforestation in the Amazonia: A case study in Rondonia State (RO), Brazil. *Acta Amazonica* 29:395-409.

- Malmer, A.** (1992) Water-yield changes after clear-felling tropical rainforest and establishment of forest plantation in Sabah Malaysia. *Journal of Hydrology* 134:77-94.
- Marin, C.T.; Bouten, W. y Sevink, J.** (2000) Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia. *Journal of Hydrology* 237 (1-2): 40-57.
- Mark, A.F. y Dickinson, K.J.M.** (2008) Maximizing water yield with indigenous non-forest vegetation: A New Zealand perspective. *Frontiers in Ecology and the Environment* 6:25-34.
- Meyers, T.P.** (2001) A comparison of summertime water and CO₂ fluxes over rangeland for well watered and drought conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* 106:205-214.
- Melchanov, V.A.** (1966): *Gidrologicheskoi rol lechzba*. Am S.S.S.R. Moscú. P 488.
- Melchanov V, A. Herrero, J,A. Mora, N y Plasencia, T. (1990)** Informe científico (final) contrato 004.20.31 Definir la afectacion que sobre el rendimiento hidrico, la erosion y la calidad de loas aguas ejercen los distintos tipos de talas y los cultivos agricolas. Habana Cuba 1990 .Intituto de Investigaciones Forestales.
- Melchanov, V. A. y Mora, N.,** (1990) Informe final del proyecto hidrologia . Instituto Investigaciones Forestales. Habana. Cuba
- MINAG,** (2006) Estrategia Ambiental de Ministerio de la Agricultura
- Möller, D.** (1990) The Na/Cl ratio in rainwater and the seasalt chloride cycle. *Tellus* 42B:254-262.
- Morejón, Y.M.** (2005) Análisis de los recursos edáficos e hídricos en la cuenca del río Mantua. Suficiencia investigativa.
- Morejón, Y. M.** (2009) Análisis del estado actual y tendencias previsibles de los recursos edáficos e hídricos en cuencas del occidente de Cuba. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante.
- McMahon, T.A.; Western, A.W. y Vertessy R.A** (2005) A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation *Journal of Hydrology* 310:28-61.

McNicol DK, Mallory ML, Laberge C, Cluis DA (1998) Recent temporal patterns in the chemistry of small acid-sensitive lakes in Central Ontario, Canada. *Water, Air and Soil Pollution* 105:343-351.

Molchanov, A. A. (1961): Bosque y clima.p279

Molina, A. R. (1981): Influencia del bosque en el régimen hidrológico. Metodología general y específica de las investigaciones. (Mecanografiado) Centro de investigación Forestal. 56 p.

Molina, A. R. y Fernández, J. (1983): Interceptación de la lluvia por el bosque de coníferas en la parte superior de la cuenca del río San Diego.

Molchanov, A. A. (1960): Función hidrorreguladora del bosque. Editora de la Academia de Ciencia de la URSS Moscú. P 468.

Moore PD, Chaloner B, Stott P (1996) *Global environmental change* Blackwell Science.

Muttiah, R.S. y Wurbs, R.A. (2002) Scale-dependent soil and climate variability effects on watershed water balance of the SWAT model. *Journal of Hydrology* 256:264-285.

Nakos, G. y Vouzaras, A. (1988) Budgets of selected cations and anions in two forested experimental watersheds in central Greece. *Forest Ecology and Management* 24:85-95.

Navar, J; Charles, F y Jurado, E. (1999) Spatial variations of interception loss components by Tamaulipan thornscrub in northeastern Mexico. *Forest Ecology and Management* 124 (2-3): 231-239.

Nilssen JP (1980) Acidification of a small watershed in southern Norway and some characteristics of acidic aquatic environments. *International Revue der Gesamten Hydrobiologie* 65:177-207.

Nisbet, et al. (1995) An investigation of the impact of afforestation on stream-water chemistry in the Loch Dee catchment, SW Scotland. *Environmental Pollution* 90(1):111-120

Nishimura, T. (1973): Movements of nutrient in a small mountainous and forested watershed. *Journal of the Japanese Forestry. Society.* 55: 323-333.

Nodvin, S.C.; Driscoll, C.T, Likens, G.E. (1988) Soil processes and sulphate loss at the Hubbard Brook Experimental Forest. *Biogeochemistry* 5:185-199.

Norton, S.; Kahl J. y Fernandez, I. (1999) Altered soil-l water interactions inferred from stream water chemistry at an artificially acidified watershed at Bear Brook Watershed, Maine USA. Environmental Monitoring and Assessment. 55: 97-111.

Okuda, T., Iwase, T., Ueda, H., Suda, Y., Tanaka, S., Dokiya, Y., Fushimi, K., Hosoe, M. (2005). Long-term trend of chemical constituents in precipitation in Tokyo metropolitan area, Japan, from 1990 to 2002. Science of the Total Environment. 339(1-3): 127-141.

Ortega, F. (1979): La materia orgánica y el humus de los suelos de Cuba. Instituto de suelo .ACC. p129.

Oliinik, V.S. & Shubatry, O. (1978): Uliiance splache hig rabok. No ismereni stoca regulatiro, ushhciroli clavix lesov. Curpat lesovedero N 4 12-60 nauca Moscú.p16.21.

O'Loughlin, C. L., Rowe, L. K. & Ponce, A. J. (1980): Sediment yield water quality responses to clearfelling of evergreen mixed forests in western New Zealand. Actes du colloque d'Helsinki, IAHS. 13 p 285-292.

Paltridge G, Arking A, Pook M (2009) Trends in middle- and upper-level tropospheric humidity from NCEP reanalysis data. Theoretical and Applied Climatology 10.1007/s00704-009-0117-x.

Parfitt, R.L. et al (2002) TI: Clear-cutting reduces nitrate leaching in a pine plantation of high natural N status. Forest Ecology and Management 70(1-3): 43-53

Park C (1997) The environment. Principles and applications. Routledge.

Park, Y.; Lee, D.K., Kim D.Y. (1999) Nutrient dynamics in the throughfall, stemflow and soil solution of Korean pine, Japanese larch and hardwood stands at Kwangju-Gun, Kyonggi-Do. Journal of Korean Forestry Society 88:541-554.

Parker, R.S. y Troutman, B.M. (1989) Frequency distribution for suspended sediment loads. Water Resources Research 25:1567-1574.

Palmer, S.M.; Driscoll, C.T. y Johnson, C.E (2004). Long-term trends in soil solution and stream water chemistry at the Hubbard Brook Experimental Forest: relationship with landscape position. Biogeochemistry 68:51-70.

- Pearce, A.J.** 1986. Erosion and sedimentation. Working Paper Environment and Policy institute. Honolulu, Hawaii
- Perera, J. R.** 1975: Influencia del bosque en la calidad del agua. Voluntad Hidraulica. Año XII. N 36 La Habana
- Pérez J M, Durán J, Portuondo O y Lemus B** (1984): Utilización de las topo secuencias para el diagnóstico de los suelos erosionados. Reporte de Investigación. No.11, Instituto de Suelos, Academia de Ciencias de Cuba, 16 pp.
- Pejon, O. J. y Zuquette LV** (1990): Evaluación del riesgo potencial de erosión de Piracicaba (Brasil). En VI Congreso Nacional y Conferencia Internacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio, Brasil, Memorias Volumen II, pp. 187 – 195
- Piñol, J.** (1990) Hidrologia i biogeoquímica de conques forestades de les muntanyes de Prades. Tesis doctoral, Universitat de Barcelona.
- Piñol, J.; Lledó, M.J. y Escarré, A.** (1991) Hydrological balance of two Mediterranean forested catchments (Prades. northeast Spain) Hydrological Science Journal 41:125-135.
- Piñol, J.; Avila, A. y Roda, F.** (1992) The seasonal variation of streamwater chemistry in three forested Mediterranean catchments. Journal of Hydrology 140:119-141.
- Piñol, J.; Avila, A.; Escarré, A.; Lledó, M.J. y Rodà, F.** (1992) Comparison of the hydrological characteristics of three small experimental holm oak forested catchments in NE Spain in relation to larger areas. Vegetation 99-100:169-176.
- Piñol, J.; Terradas, J.; Avila, A. y Rodà, F.** (1995) Using catchments of contrasting hydrological conditions to explore climate change effects on water and nutrient flows in Mediterranean forests. En Moreno JM, Oechel WC (eds) Global change and Mediterranean-type ecosystems pp: 251-264. Springer.
- Piñol J. Ávila A. Escarré A** (1999) Water balance in catchments en Rodà F. Retana J. Gracia CA. Bellot J (eds) Ecology of Mediterranean evergreen oak forest pp 273-282. Springer.
- Portal J, López – Acevedo M, Reguero C** (1989): Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi Prens, 849 pp

Probst, A.; Fritz, B. y Viville, D. (1995) Mid-term trends in acid precipitation, stream water chemistry and element budgets in the strengbach catchment (Vosges Mountains, France) *Water, Air and Soil Pollution* 79:39-59.

Phillips, S.D.; Mattick, J.L.; Duval, T.A.; Elmore, D. y Kubik, P.W. (1988) Chlorine 36 and tritium from nuclear weapons fallout as tracers for long-term liquid and vapour movement in desert soils. *Water Resources Research* 24:1877-1891.

Plasencia, T.; Renda, A. y Herrero, J.A. (2004) Tala selectiva una opción alternativa para el desarrollo forestal sostenible. Tercer congreso Forestal de Cuba y III Simposium Internacional de Técnicos Agroforestales. Memorias ISBN 959-246-119-8.

Plasencia, T.; Escarré, A.; Renda, A.; Montalvo, J.M. y Artiaga, A. (2005) Relación entre la precipitación. el escurrimiento y la evapotranspiración determinada en bosques de pinares de Pinar del Río. Jornada científica EEF. Guisa. Memorias ISBN 954- 246- 153-8.

Prebble, R.E. y Stirk, G.B. (1988) Hydrological effects of land use change in small catchments at the Narayen Research Station. Queensland. Australian Journal of Soil Research 26:231-242..

Price, A. G y Carlyle, M (2003) Measurement and modelling of growing-season canopy water fluxes in a mature mixed deciduous forest stand, southern Ontario, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology* 119 (1-2): 69-85.

Rajmanov, V.V. (1960): Vadoregulirucis hhuir. Rol Lesov.p153-192.

Rakhmanov, V.V. (1984): Papel hidroclimatico de los bosques. Lesnaya promishlinnest. P 240.

Renberg, I. (1987) The acidification history of lakes inferred from subfossil diatoms in sediments. *Acidification Research in Sweden* 5:9-10.

Renda, A., Unda, A., Houssin, J. (1974): Los suelos de la cuenca del río San Diego. Centro de Investigación y Capacitación Forestal (CICF), La Habana, 91p, Multicopiado.

Renda, A.; Plasencia, T.; Herrero, J.A. y Vidal, A. (2003) Bienes y servicios ambientales obtenidos del raleo de pinares. Trabajo presentado en el III Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográficas. Arequipa. Perú. Memorias.

- Renda, A. Herrero, J. y Plasencia, T.** (2004) La hidrología forestal en Cuba. Revista Forestal Baracoa nº especial pp 51-56.
- Richards, P.W.** (1996) The tropical rain forest an ecological study. Cambridge University Press.
- Riverol M (1999):** "Uso y Manejo de los suelos afectados por la erosión en los agroecosistemas de las provincias occidentales y centrales del país" [inédito], Informe final proyecto 01-30-5003. PNCT Los cambios globales y la evaluación del Medio Ambiente. Instituto de Suelos, MINAGRI.
- Roberts, J.M.** (1983) Forest transpiration: a conservative hydrological process? Journal of Hydrology 66:133-141.
- Roberts J.** (1999) Catchment and process studies in forest hydrology: implications for indicators of sustainable forest management.
- Ruprecht, J.K.; Schofield, N.J. y Crombie D.S. Vertessy RA. Stoneman GL** (1991) Early hydrological response to intense forest thinning in southwestern Australia. Journal of Hydrology 127:261-277.
- Rutter, A. J.** (1963) Studies in the water relations of *Pinus sylvestris* in plantations conditions. I Measurements of rainfall and interception. Journal of Ecology 51: 191-203.
- Sagué H. Hernández L. Ortega J. Lastre L** (1979) Balance hídrico y erosión en la Sierra del Rosario. Revista Voluntad Hidráulica 49-50: 28-36.
- Samek, V.** (1967) Elementos de Silvicultura de los Pinares. Ed Universitario. La Habana 103p.
- Sakurai, T., Fukushima K, y Yamada T.** (1998) Characteristics of river water quality in relation to geological environments at the eastern foot of the Hida Mountains, Japan. Japanese Journal of Limnology. 59:87-100.
- Salati, E.** (1991) Possible climatic impacts of tropical deforestation. Climatic Change 19:177-196.
- Sakurai, T., Fukushima K, y Yamada T.** (1998) Characteristics of river water quality in forested watersheds. Japanese Journal of Limnology 56:76-89.
- Sánchez, J.R.** (1997) Efectos erosivos de los tratamientos usados para la preparación del terreno antes de la repoblación, en zonas áridas. Tesis doctoral, Universidad de Alicante.

- Shannon J** (1999) Regional trends in wet deposition of sulphate in the United States and SO₂ emissions from 1980 through 1995. *Atmospheric Environment* 33:807-816.
- Seager, J.** (1995) Atlas del estado del medio ambiente. Ediciones Akal
- Singer, A.; Ganor, E.; Fried, M. y Shamay, Y.** (1996) Throughfall deposition of sulfur to a mixed oak and pine forest in Israel. *Atmospheric Environment* 30:3881-3889.
- Silberstein, R.; Held, A.; Hatton, T. Viney, N. y Sivapalan, M.** (2001) Energy balance of a natural jarrah (*Eucalyptus marginata*) forest in Western Australia: Measurements during the spring and summer. *Agricultural and Forest Meteorology* 109:79-104.
- Soulsby C, Turnbull D, Langan SJ, Owen R, Hirst** (1995) Long-term trends in stream chemistry and biology in North-East Scotland: evidence for recovery. *Water, Air and Soil Pollution* 85:689-694.
- Sokolovskii, D. L.** (1959): Reshnoi ctoco az-ba. Gidrometeorogis heskoc. Suplemento especial Universidad para todos.(2004): Meteorología y Climatodologia. Habana.
- Summers, PW** (1995) Time trends of wet deposition acidifying potential at five ecological monitoring sites in eastern Canada 1981-1993. *Water, Air and Soil Pollution* 85:653-658.
- Shuttleworth WJ (1988):** Evaporation from Amazonian rainforest. *Proceedings of the Royal Society of London.* 233B:321-346
- Scott, D.F. y Lesch, W.** (1996) The effects of riparian clearing and clearfelling of an indigenous forest on streamflow, stormflow and water quality. *South African Forestry Journal.* 175:1-14.
- Schaefer, D.A.; McDowell, W.H.; Scatena, F.N. y Asbury CE** (2000) Effects of hurricane disturbance on stream water concentrations and fluxes in eight tropical forest watersheds of the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. *Journal of Tropical Ecology* 16:89-207.
- Schlesinger, W.H.** (2000) Biogeoquímica. Un análisis del cambio global. Ariel Ciencia.

- Scott, D.F. y Lesch, W.** (1996) The effects of riparian clearing and clearfelling of an indigenous forest on streamflow, stormflow and water quality. *South African Forestry Journal* 10:1-14.
- Shuttleworth, W.J.** (1988) Evaporation from Amazonian rainforest. *Proceedings of the Royal Society of London*. 233B:321-346.
- Smith, R.E.** (1991) Effect of clearfelling pines on water yield in a small eastern Transvaal catchment South Africa. *Water (Pretoria)* 17:217-224.
- Stednick, J.** (1996) Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *Journal of Hydrology* 176:79-95.
- Stoneman, G.L.** (1993) Hydrological response to thinning a small jarrah (*Eucalyptus marginata*) forest catchment *Journal of Hydrology* 150:393-407.
- Spanos, Th., Simeonov, V., Andreev, G.** (2002). Environmetric modeling of emission sources for dry and wet precipitation from an urban area. *Talanta*. 58(2): 367-375.
- Tetzlaff, D.; Malcolm, I.A. y Soulsby, C.** (2007) Influence of forestry, environmental change and climatic variability on the hydrology, hydrochemistry and residence times of upland catchments. *Journal of Hydrology* 346:93-111.
- Terradas, J. y Roda, F.** (1988): Deu anys de recerca al Montseny. 2 Vol. Unitat d'Ecologia. Universitat Autònoma de Barcelona. Bellaterra, Barcelona.
- Thompson DWJU, Kennedy JJ, Wallace JM, Jones PD** (2008) A large discontinuity in the mid-twentieth century in observed global-mean surface temperature. *Nature* 453, doi:10.1038/nature06982.
- Trenberth K.E. and D.J. Shea,** 1997: Atmospheric Circulation Changes and links to change in rainfall and drought. A.M.S. Seventh Conference on Climate Variation, Long Beach C.A.
- Tipping, E.; Bettney, R.; Hurley, M.A.; Isgren, F.; James, J.B.; Lawlor, A.J.; Loft, S.; Rigg, E.; Simon, B.M.; Smith, E.J. y Woof, C.** (2000) Reversal of acidification in tributaries of the River Duddon (English Lake District) between 1970 and 1998. *Environmental Pollution* 109:183-191.
- Thompson ME, Elder FC, Davis AR, Whitlow S** (1980) Evidence of acidification of rivers in eastern Canada en Drablos D, Tollan A (eds) *Ecological impacts of acid precipitation* pp 244-245. SNSF Project, Norway.

- Vallory, D.** (1999) Influence of calcareous soil particulates on acid rain. Belo Horizonte Metropolitan Region, Brazil. *Ambio* 28:514-518.
- Vega R, Cutié V, Centella A** (1987) Análisis del comportamiento de los totales de lluvia caída en Cuba sobre la base de una clasificación de sequía. Informe técnico Instituto de Meteorología. Cuba.
- Vega M** (2006a): Evaluación de la erosividad de la lluvia en regiones de uso agropecuario en la porción central de la provincia La Habana. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 40(2).
- Vogt, R.D. y Muniz, I.P.** (1997) Soil and stream water chemistry in a pristine and boggy site in mid-Norway. *Hydrobiologia* 348:19-38.
- Vörösmarty, C.J.; Moore, B.; Grace, A.L.; Gildea, M.P.; Melillo, J.M.; Peterson, B.J.; Rastetter, E.B. y Steudler, P.A.** (1989) Continental scale models of water balance and fluvial transport: an application to South America. *Global Biogeochemical Cycles* 3:241-265.
- Ward R.C. and Robinson, M.** (1990) *Principles of Hydrology*. MacGraw Hill, London, 3rd, ed. 365p.
- Wang, D & Deng, W.** (2001). Atmospheric SO₂ pollution and acidity of rain in Changchun China. *Water, Air and Soil Pollution* 131:1631-1634.
- Watt WD, Scott D, Ray S** (1979) Acidification and other chemical changes in Halifax County lakes after 21 years. *Limnology and Oceanography* 24:1154-1161.
- Watmough SA, Aherne J, Eimers MC, Dillon PJ** (2007) Acidification at Plastic Lake, Ontario: Has 20 years made a difference? *Water, Air and Soil Pollution* 7:301-306.
- Webb, B.V. & Nobilis, F.** (1994): Water temperatura behaviour in the river Danube during the twentieth. *Hydrobiology* 291 (2) p 105-113.
- Wilson, K.B.; Hanson, P.J.; Mulholland, P.J. y Baldocchi, D.D. y Wullschlegel, S.T.** (2001) A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: Sap-flow. soil water budget. Eddy covariance and catchment water balance. *Agricultural and Forest Meteorology*. 106:153-168.

- Whitehead, P.G. y Neal, C.** (1987) Modelling the effect of acid deposition in upland Scotland. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences 78:385-302.
- Wright, P.B.** (1971): Spatial en temporal variación in seasonal rainfall on south western Australia. Mios publ. Agric. Dept. Univ. West. P 71.
- Wright RF, Gjessing ET** (1976) Acid precipitation: changes in the chemical composition of lakes. Ambio 5:219-223.
- Wright HE, Kutzbach JE, Webb T *et al.*** (eds.) (1993) Global climate since the last glacial maximum. University of Minnesota Press.
- Xiao, Y; Dai, L; Niu, D; Tong, F; Chen, y Deng, H** (2002) Influence of canopy on precipitation and its nutrient elements in broadleaved Korean pine forest on the northern slope of Changbai Mountain. Journal of Forestry Research 13 (3): 201-204.
- Yamada T, Inoue T, Fukuhara H, Nakahara O, Izuta T, Suda R, Takahashi M, Sase H, Takahashi A, Kobayashi H, Ohizumi T, Hakamata T** (2007) Water, Air and Soil Pollution 7:259-266.
- Zon, R.** (1912) Forest and water in the light of scientific investigations. U.S. Senate Doc. 469. 62d Congr. 2ª Sess. 106 pp.

ANEXOS

Tabla 3.1 Características de las parcelas para escurrimiento cortical.

No del ensayo	Especie principal	Inclinación en Grados	Cantidad de árboles/ha	Altura (m)	Reserva (m ³ /ha)	Densidad %	Edad	Cantidad de árboles control	Superficie copa árboles control (m ²)
1	Pino	20.5	633	21	226.6	70	40	5	82.0
2	Pino	8-13	633	21	256.6	70	40	10	100.9
3	Latí folia	0-12.5	1000	20	300	100	40	5	156.9

Tabla 3.2. Características de los árboles de control

Nº del árbol	Denominación de árbol	Diámetro Cm	Altura m	Edad años	Superficie de la copa m²
PARCELA EXPERIMENTAL No 1					
1	PINO	28	24	30	18.7
2		27	21	28	12.6
3		25	20.5	29	12.8
4		26	21	25	12.0
5		30	26.5	31	25.85
PARCELA EXPERIMENTAL No 2					
8	PINO	18	20	20	3.5
9		24	20.5	23	12.0
12		22	20	25	7.2

18		28	25	32	13.0
21		24	25	23	10.8
22		32	27	34	16.7
25		18	19	20	7.6
26		17	20	20	2.8
31		32	27	34	17.8
32		27	24	31	9.5
PARCELA EXPERIMENTAL No 3					
1	OCUJE	24	20	20	47.6
2	JAGUA	24	18	20	14.7
3	YABA	15	20	20	15.7
4	ALMACIGO	36	21	20	30.7
5	MACURIJE	24	22	20	48.2

Tabla 3.3. Interceptación de las precipitaciones por el dosel forestal en por ciento, Coníferas y Latifolias.

Mes	1982					1983					1984					1985			Promedio intercep 19982-1985
	P mm	I mm/ min	% Intercept.		P mm	Intensid mm/min	% Intercept.		P Mm	I mm/min	% Intercept.		P mm	Intensid mm/min	% Intercept.				
			C	L			C	L			C	L			C	L			
1	29.7	0.019	5.4	19.9	304.8	0.100	20.0	22.9	35.5	0.034	13.0	34.0	38.9	0.013	22.0	29.6	15.3	26.1	
2	50.0	0.37	3.9	3.8	190.3	0.065	19.2	29.6	102.3	0.108	15.8	24.5	26.9	0.12	24.3	35.0	15.8	24.5	
3	72.1	0.049	15.1	26.7	143.3	0.082	24.8	30.5	57.8	0.045	20.2	21.2	113.3	0.16	35.1	35.3	23.8	28.4	
4	154.6	0.084	8.2	14.3	86.2	0.058	10.9	14.7	21.7	0.100	22.9	23.5	85.8	0.05	28.0	31.4	17.5	23.2	
5	214.9	0.033	12.9	36.6	31.5	0.040	4.0	20.6	163.8	0.058	19.5	25.3	197.8	0.22	11.4	26.3	12.0	27.2	
6	769.4	0.112	20.2	31.2	248.0	0.079	11.0	20.4	275.1	0.214	11.1	17.1	57.1	0.08	24.2	30.6	26.6	24.8	
7	121.7	0.06	24.8	30.3	186.3	0.145	20.3	16.8	234.0	0.145	22.8	23.2	154.8	0.144	22.1	21.2	22.5	22.9	
8	131.8	0.07	17.7	36.5	307.3	0.090	13.5	13.0	156.5	0.104	0.3	17.4	302.4	0.095	15.0	19.4	11.6	22.8	
9	140.0	0.08	13.2	28.3	137.6	0.047	19.4	25.4	239.0	0.133	15.4	14.1	383.2	0.22	26.1	27.6	18.5	23.8	
10	137.9	0.06	3.2	16.8	250.6	0.073	11.0	20.5	77.2	0.154	37.5	44.7	51.8	0.02	32.0	35.6	20.9	35.6	
11	81.2	0.03	8.8	31.5	24.2	0.052	29.2	41.4	163.8	0.112	12.5	21.0	80.3	0.07	38.6	43.7	22.2	34.4	
12	32.2	0.04	7.3	20.7	95.4	0.079	24.4	30.0	--	--	--	--	29.0	0.11	21.6	23.5	17.7	24.7	
X	1976.9	0.065	15.1	28.3	2065.5	0.077	16.4	22.5	1526.7	0.108	15.6	21.5	1521	0.087	23.2	27.5	17.6	24.9	

P = Precipitación, I = Intensidad, C = Coníferas y L = Latifolias

Tabla 4.7. Tendencia del calentamiento observado en la estación (temperatura media del agua por meses)

Años	enero	Febr	mar	abr	may	jun	Jul	ago	sep	oct	nov	dic
1979	19.1	18.8	21.2	20.8	22.8	23.1	24.2	23.9	23.6	23.1	20.6	19.7
1980	18.8	18.2	20.3	21.4	23.1	23.7	24.4	24.0	23.4	23.8	21.2	18.8
1981	19.2	18.4	20.4	20.1	22.9	23.8	24.5	24.4	24.1	24.0	21.5	21.6
1982			20.6	23.0	24.6	23.0	24.7					
1983	19.3	19.8	20.1	21.0	23.4	22.9	24.5	24.0	23.1	23.4	21.7	20.6
1984	20,6	18.9	21.6	0	23.0	23.2	23.2	23.3	23.1	22.6	19.8	18.9
1985	17.4	19.3	18.6	0	22.5	24.1	24.2	23.4	23.3	23.2	22.1	20.5
1986	0	19.2	19.4	0	23.0	23.8	24.0	23.6	23.2	22.8	22.2	20.6
1987	18.4	19.0	21.1	20.0	22.9	23.7	24.6	24.4	24.6	22.0	22.5	20.2
1988	19.4	20.1	0	0	22.5	23.8	24.2	24.2	24.3	22.8	22.1	19.4

1989	19.6	19.0	18.7	22.2	23.2	27.3	23.2	24.0	23.9	21.8	21.1	18.6
1990	20.2	20.5	20.9	0	22.2	22.6	23.4	24.1	23.6	23.4	23.3	20.7
1991	21.0	22.9	21.5	22.6	22.8	23.4	23.8	24.0	23.6	23.3	21.8	22.2
1992	19.7	22.6	21.5	22.6	22.9	23.6	26.2	23.9	23.7	23.3	23.1	20.7
1993												
1994												
1995												
1996	18.5	18.8	20.9	22.5	24.8	23.3	23.0	23.2	23.5	23.5	21.4	20.7
Años	enero	Febr	mar	abr	may	jun	Jul	ago	sep	oct	nov	dic
1997	21.1	21.6	22.5	22.9	23.5	23.7	23.6	23.4	23.8	23.6	23.6	23.3
1998	23.4	23.0	22.2	23.5	23.8	24.4	24.3	24.3	24.8	24.0	23.4	23.0
1999	19.8	0	0	0	22.7	23.0	23.1	23.0	23.8	23.6	21.7	20.0
2000	21.0	20.8	21.5	0	0	0	23.6	23.4	23.2	23.1	22.5	21.4
2001	21.5	0	0	0	23.4	23.8	23.6	23.7	23.5	23.6	22.3	22.7
2002	21.8	22.5	22.2	0	23.6	23.7	23.7	23.5	23.5	23.6	22.3	20.0
2003	19.4	20.1	21.0	22.4	22.7	22.6	23.2	22.8	23.5	23.2	23.8	20.7
2004	20.5	20.5	21.1	0	21.5	22.9	23.8	23.3	23.5	23.2	23.1	21.7
2005	22.7	20.8										

Tabla 6.5. Índices de escurrimiento en las subcuencas estudiadas.

AÑO	PREC	SUBCUENCA I Tala selectiva				SUBCUENCA II Control				SUBCUENCA III Tala rasa total				SUBCUENCA IV Bosque de galería	
ANTES DE LAS TALAS (1 ^{ER} PERÍODO).															
		Lam. (mm)	Mod. l/seg./ha	Coef.	Lam. (mm)	Mod. l/seg./ha	Coef.	Lam. (mm)	Mod. l/seg./ha	Coef.	Lam. (mm)	Mod. l/seg./ha	Coef.		
1979	2299	805	0.25	0.35	920	0.29	0.40	920	0.29	0.40	874	0.28	0.38		
1980	1902	533	0.17	0.28	704	0.19	0.37	590	0.23	0.31	647	0.20	0.34		
1981	1104	132	0.04	0.11	155	0.06	0.14	254	0.08	0.23	155	0.05	0.14		
prom.	1768	490	0.15	0.25	593	0.18	0.30	588	0.20	0.31	558	0.17	0.28		
DESPUÉS DE LA TALA (2 ^{DO} PERÍODO).															
1983	2171	868	0.28	0.39	932	0.30	0.42	1017	0.32	0.46	995	0.31	0.45		
1984	1557	592	0.15	0.31	607	0.19	0.38	607	0.19	0.38	747	0.22	0.47		
1985	1586	394	0.12	0.24	466	0.15	0.29	503	0.16	0.31	505	0.16	0.32		
1986	1784	539	0.17	0.30	659	0.21	0.36	596	0.19	0.33	570	0.18	0.31		
1987	1587	214	0.07	0.13	182	0.06	0.11	314	0.10	0.19	205	0.08	0.12		
1988	1684	304	0.10	0.18	236	0.07	0.14	305	0.10	0.18	204	0.08	0.12		
1989	1942	357	0.11	0.18	338	0.11	0.17	334	0.11	0.17	405	0.13	0.21		
Prom	1758	467	0.14	0.24	487	0.16	0.27	525	0.17	0.29	519	0.16	0.28		

DESPUES DE LA TALA (3 ^{ER} PERIODO)													
1990	1658	175	0.05	0.10	211	0.07	0.13	231	0.07	0.14	247	0.08	0.19
1991	1912	290	0.09	0.15	257	0.08	0.13	292	0.09	0.15	302	0.09	0.16
1993	1859	354	0.11	0.19	370	0.12	0.20	437	0.14	0.24	539	0.17	0.29
1994	1922	673	0.21	0.35	630	0.20	0.33	464	0.15	0.24	540	0.17	0.28
1995	2844	1263	0.40	0.40	1289	0.40	0.45	1172	0.37	0.41	1 115	0.37	0.40
1996	1959	694	0.22	0.35	679	0.21	0.35	613	0.19	0.31	618	0.20	0.32
1997	1972	522	0.17	0.27	454	0.15	0.23	531	0.17	0.27	659	0.21	0.33
1998	1935	724	0.23	0.37	755	0.24	0.39	563	0.18	0.29	574	0.18	0.30
1999	1938	773	0.25	0.40	677	0.21	0.45	721	0.23	0.37	EQUIPO ROTO		
2000	1245	196	0.06	0.16	189	0.06	0.15	202	0.06	0.16	EQUIPO ROTO		
2001	1822	591	0.19	0.32	450	0.14	0.25	546	0.17	0.30	380	0.12	0.21
2002	2060	890	0.28	0.43	922	0.29	0.45	667	0.21	0.32	649	0.21	0.31
2003	2038	754	0.24	0.37	662	0.21	0.32	422	0.13	0.21	-	-	-
Prom	1936	608	0.19	0.30	580	0.18	0.29	528	0.17	0.24	606	0.18	0.28

Tabla 6.8. Datos mensuales de escurrimiento años 1979, 1980 y 1981, antes de las actuaciones y posterior a ellas 82-84 (lámina en mm)

(79-81)			
<u>C2</u>	<u>C1</u>	<u>C3</u>	<u>C4</u>
21.7	22.1	26.6	22.9
11.3	7.2	13.0	15.2
4.5	4.4	6.8	5.2
140.8	185.1	195.0	167.5
55.5	56.0	37.4	57.4
15.5	14.7	18.7	7.6
104.3	90.5	108.9	129.1
43.1	33.0	43.7	37.0
212.8	153.1	169.2	172.2
150.9	117.7	134.6	108.0
103.6	73.7	109.5	98.2
61.4	40.1	74.5	64.0
38.0	22.4	45.8	74.5
25.8	22.4	31.9	41.2
24.9	19.2	34.8	23.9
5.0	2.6	5.8	2.3
9.4	10.2	9.5	5.9
16.9	16.1	20.2	14.7
76.2	44.8	85.5	47.5
140.9	104.4	151.0	90.2
102.3	88.8	117.6	95.1
150.7	109.5	125.1	167.5
94.6	93.1	96.3	81.9

(82-84)			
<u>C2</u>	<u>C1</u>	<u>C3</u>	<u>C4</u>
0	0.1	2.3	0
0	0.3	5.7	0.7
1.8	5.3	38.7	17.5
2.2	7.7	44	58.3
65.0	61.2	113.7	114.5
621.3	471.5	576.4	570.1
5.2	4.7	10.8	17.1
12.9	12.1	18.5	24.8
45.9	36.1	57.4	67.6
133.5	88.0	173.2	167.6
41.1	35.7	41.2	40
1.5	1.5	5.1	2.8
158.1	144.2	181.4	161.7
153.2	130.3	154	154.5
137.6	105.3	123.3	131.5
26.3	24.4	36.2	35.8
0.8	1.5	3.2	1.9
53.6	65.4	90.6	83.1
32.1	34.9	52.1	32.3
155.1	130.7	116.2	112.9
66.1	73.1	88.5	94.4
151.8	125.7	136.3	161.4
10.1	35.7	10.3	9.6

15.3	2.1	13.8	0.8
1.0	0.0	8.3	3.1
2.3	0.0	8.4	3.3
0.0	0.0	1.9	0.4
0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	2.4	1.5	0.4
27.7	30.5	23.1	29.4
13.5	10.6	23.6	7.7
40.7	36.9	54.3	29.1
54.2	36.6	92.2	71.5
12.9	13.1	23.5	13.9
1.5	1.1	13.0	1.2
0.7	1.0	6.8	0.6

7.9	5.4	22.5	7.7
11.9	3.4	9.5	4.9
2.1	3.6	12.4	4.3
1.4	1.7	6.2	3.1
0	0	0.7	0
24.5	30.5	44.6	45.7
103.1	86	112.5	226.5
87	102.8	96.7	105.2
112.5	76.6	107	122.2
119.6	95.6	113.3	137.4
27.7	15.2	21.8	25.2
98.7	58.9	70.7	35.3
5.3	1.5	6.7	0.3

Reunido el Tribunal que suscribe en el día de la fecha acordó otorgar, por a la Tesis
Doctoral de Don/Dña. la calificación de .

Alicante de de

El Secretario,

El Presidente,

**UNIVERSIDAD DE ALICANTE
CEDIP**

La presente Tesis de D. _____ ha sido
registrada con el nº _____ del registro de entrada correspondiente.

Alicante ____ de _____ de _____

El Encargado del Registro,